

Grenoble INP
Université de Grenoble

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

Technologies logicielles
de la modélisation, de la simulation
et de l'interaction
multisensorielles instrumentales
pour la création

Préparé dans le cadre de
l'Ecole Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement
par

Nicolas Castagné

Soutenu publiquement le 17 octobre 2014 devant le Jury composé de

Pr Marcelo M. Wanderley, IDMIL/CIRMMT, McGill University, Canada	Rapporteur
Pr Stefania Serafin, Medialogy Aalborg, Université de Copenhague, Danemark	Rapporteur
Pr Giovanni De Poli, CSC, Université de Padoue, Italie	Rapporteur
Pr Laurence Nigay, IIBM/LIG, Université Joseph Fourier, Grenoble, France	Présidente
HdR Claude Cadoz, ACROE/Ministère de la Culture et ICA/Grenoble INP, France	Examineur

Avertissement

Mes travaux de recherche, dont il est fait état dans ce mémoire, se sont déroulés au sein du groupe ACROE-ICA. Ils ont été conduits dans le cadre de projets internes au laboratoire avec mes collègues permanents et non permanents, ainsi que dans le cadre de projets impliquant d'autres laboratoire et organismes.

Je me suis efforcé de citer dans ce mémoire les nombreux contributeurs et de préciser ma contribution. Toutefois, ce mémoire ne constitue pas en lui même une publication scientifique, puisque les co-auteurs des travaux dont il est question ne sont identifiés, au mieux, qu'au sein du document et non pas comme co-auteurs de ce dernier.

C'est pourquoi ce mémoire ne devrait pas faire l'objet de citation en tant que publication scientifique. Toute référence aux travaux ici rapportés devrait s'appuyer sur les différentes publications (actes de conférences, articles de journaux, ouvrages...) qui s'y rattachent. Enfin, les publications ou usages ultérieurs qui pourraient se baser sur ou reprendre tout ou partie des travaux ici évoqués, se devront de respecter les participations de chacun, passées et présentes.

Remerciements

Je souhaite tout d'abord vivement remercier Marcelo Wanderley, Stefania Serafin et Giovanni De Poli pour avoir accepté de lire ce mémoire et d'en être rapporteurs. Je remercie également les autres membres du Jury : Laurence Nigay et Claude Cadoz.

Je voudrais remercier chaleureusement mes collègues Claude Cadoz, Annie Luciani et Jean-Loup Florens, fondateurs du groupe de recherche ICA-ACROE. Leurs travaux avant mon arrivée à Grenoble, et durant toutes ces années, ont construit le cadre théorique, scientifique et technologique qui a constitué le terreau indispensable à mon activité. Leur enthousiasme, leur dynamisme scientifique, leurs positionnements, leurs éclairages ont été, et sont encore, un guide essentiel pour moi. Parmi eux, j'adresse plus spécifiquement encore mes remerciements à Claude et Annie pour la qualité de leur encadrement scientifique tout au long des recherches auxquelles j'ai contribué sous leur responsabilité.

Les travaux rapportés dans ce mémoire ont été le plus souvent conduits en collaboration ; je souhaite remercier tous les collègues, chercheurs, doctorants, ingénieurs, techniciens, stagiaires et chargés d'administration qui ont contribué à ces travaux - en espérant n'oublier personne.

Au sein du groupe ICA-ACROE : Ali Allaoui, Nicolas André, Skander Bahloul, Christophe Benz, Aurélien Bertolotti, Stéphane Bœuf, Hichem Boudjabi, Claude Cadoz, Geoffrey Cerna, Antoine Cezard, Bilal Chaari, Aurélien Conil, Sylvain Daudé, Yann Davin, Patricia del Campo, Jean-Michel Demay, Guillaume Desurmont, Christophe Discours, Clément Durand, Bruno Duyé, Thomas Espinasse, Matthieu Evrard, Karine Fernandez, Jean-Loup Florens, Pierre-Adrien Fouilland, Cyrille Garino, Charles Granet, Maria Guglielmi, Saman Kalantari, Ghislain Kergadallan, Florent Lacheroy, Olivier Le Blouch, James Leonard, Thibault Lepri, Julien Lopez, Annie Luciani, Martin Mahl, Dimitri Melaye, Olivier Meunier, Florian Motteau, Thomas Paret, Delphine Passinge, Sylvain Paturel, Simon Planes, Estelle Rizzolio, Tim Robert, Kevin Sillam, Olivier Tache, Peter Torvik, Yazid Touileb, Leonor Tourneboeuf, Jérôme Villeneuve, Patrick Vovor et plus généralement tous les membres permanents ou temporaires du groupe. Parmi eux, je salue tout particulièrement tout particulièrement les doctorants que j'ai eu l'honneur de co-encadrer ou co-diriger, Saman Kalantari et James Leonard et les doctorants pour lesquels j'ai participé à l'encadrement des travaux de Thèse, Ali Allaoui, Kevin Sillam et Mathieu Evrard. Je souhaite enfin saluer mes deux collègues ingénieurs qui, depuis ma prise de fonction en tant que Maître de Conférences en 2010, assument avec brio la conduite des développements logiciels au sein du groupe dont j'étais jusqu'alors responsable : Stéphane Bœuf, qui en a désormais la responsabilité, et Nicolas André.

Dans d'autres groupes de recherche : les nombreux participants du projet ENACTIVE Interfaces (<http://www.enactivenetwork.org/index.php?13/institutions>) pour l'émulation scientifique durant tout le projet et parmi eux, en particulier, les chercheurs de IDMIL et du CSC-DEI ; durant le projet DYNAMé : Philippe Meseure, Xavier Skapin, Emmanuelle Darles, Benoit Crespin et leurs collègues ; durant le projet AMBIANT Creativity : Ludger Bruemmer et Iannis Zannos.

La préparation de ce mémoire a impacté, durant environ une année, mes activités professionnelles et personnelles. Dans la sphère professionnelle, je remercie très vivement Annie Luciani d'avoir organisé certaines des activités de notre groupe de telle sorte que je dispose du temps et la concentration nécessaires à la rédaction, ainsi que tous mes collègues qui, à un moment ou à un autre, ont dû et su faire face à un manque de disponibilité de ma part alors que j'écrivais ce texte. Dans la sphère privée, je remercie Jérémy pour son soutien, sa présence et ses dessins et Jérémy et Valentine pour m'avoir supporté les soirs et Week-End durant lesquels mon délai de réponse à la moindre question avoisinait parfois dix minutes !

Enfin, j'adresse de vifs remerciements aux deux personnes qui, par leurs conseils et leur relectures avisées et précises, ont contribué à la rédaction de ce mémoire : mon père René Castagné et, à nouveau, Annie Luciani, qui a, qui plus est, soutenu ma rédaction en veillant au respect de la propriété intellectuelle des travaux rapportés et en m'apportant ses points de vue scientifiques.

« Il serait vain de croire [...] que ce que le vivant a mis des centaines de millions d'années à élaborer, dans une interaction et une adaptation profondes avec l'environnement, peut être remodelé en quelques décennies d'informatique et quelques années de 'contrôleurs MIDI'. Le fonctionnement de nos muscles, de notre système de motricité ainsi que de notre système sensito-cognitif présente une base dont il convient de mesurer la stabilité. Pour qu'il puisse investir le nouvel espace que l'ordinateur lui ouvre, l'homme doit pouvoir y investir l'espace de son propre corps. Pour pratiquer 'les nouveaux gestes musicaux' il doit pouvoir retrouver ses gestes tout court »

**Claude Cadoz : *Musique, geste, technologie*,
Publié dans « *Les nouveaux gestes de la musique* », sous la direction de Hugues Genevois et Raphaël de Vivo. Edition Parenthèses- Marseille 1999**

« (...) ce qui est particulièrement essentiel à propos du geste instrumental, c'est que c'est précisément parce qu'il est ergotique qu'il est aussi efficacement informationnel. C'est parce qu'il est matériel, fondé sur un échange énergétique contraint par des spécificités dynamiques, morphologiques, articulatoires qu'il atteint de telles performances expressives. »
**Claude Cadoz : *Le geste canal de communication homme/machine : la communication "instrumentale"*.
Texte pour les Entretiens de Lyon - 1992**

« Cet aspect musculaire nous mène directement au geste et au mouvement, pour lequel le crayon me semble beaucoup plus efficace et vivant que l'ordinateur : le mouvement réel des images mouvantes de l'ordinateur est moins éloquent que le trait, trace du mouvement de la main de l'artiste qui guide le crayon ou le pinceau, exprime l'amplitude, la rapidité, l'intensité du geste du peintre, et les transmet également au spectateur. »
(...)

« Dans l'utilisation ou l'expression de ces ordres ou de ces règles, il est clair que les possibilités du crayon ou de la souris sont différentes. Les règles a priori sont manifestement bien adaptées à l'ordinateur, à la souris, un ordinateur peut réaliser des peintures « à la Vasarely ». En revanche, les règles sous-jacentes que suit l'artiste sans les connaître sont celles que l'artiste réalise spontanément avec son crayon. »
**Jacques Mandelbrojt : *La pensée gestuelle dans la peinture, la poésie, la musique ...et la science*
Actes du colloque des Journées d'Informatique Musicale 2009 (JIM09)
« Multisensorialité / Pluridisciplinarité »
Grenoble. Avril 2009, pp85-91.**

*« ... Lorsqu'un manuscrit indique différents degrés de *pianissimo*, le problème est que cela ne représente qu'une indication rudimentaire. Pour nous – et il avait une fois de plus levé le doigt – il existe dix mille degrés de *pianissimo* ».*
F. Conroy : *Corps et âmes*, ed. française Galimard, 2004

« L'unique chose stable, c'est le mouvement, partout et toujours »
Jean Tinguely

Plan du mémoire

AVERTISSEMENT	2
REMERCIEMENTS	4
PLAN DU MEMOIRE	8
1 INTRODUCTION ET CONTEXTE	11
1.1 PREAMBULE	11
1.2 CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE DU GROUPE DE RECHERCHES	15
1.2.1. ETUDE ET CARACTERISATION DE LA RELATION INSTRUMENTALE. FONCTION ERGOTIQUE DU GESTE INSTRUMENTAL.	15
1.2.2. TRANSDUCTEURS HAPTQUES A RETOUR D'EFFORT. LA FAMILLE DES TRANSDUCTEURS GESTUELS RETROACTIFS	17
1.2.3. SIMULATION « BASEE PHYSIQUE » ET PLATEFORMES DE CALCUL « TEMPS REEL DUR SYNCHRONE »	18
1.2.4. SYSTEME CORDIS-ANIMA, FORMALISME DES RESEAUX PHYSIQUES MASSES-INTERACTIONS POUR LA MODELISATION ET LA SIMULATION DES PHENOMENES DYNAMIQUES A L'ECHELLE DE LA SENSORI-MOTRICITE HUMAINE.	19
1.2.5. ENVIRONNEMENT LOGICIELS POUR LA CREATION AVEC LA MODELISATION PHYSIQUE	23
1.2.6. SIMULATION INTERACTIVE ET MULTISENSORIELLE D'OBJETS PHYSIQUES	23
1.3 POSITIONNEMENT GENERAL DE MES TRAVAUX	24
2 L'ENVIRONNEMENT LOGICIEL GENESIS POUR LA CREATION SONORE ET MUSICALE AVEC LES RESEAUX PHYSIQUES MASSES-INTERACTIONS	29
2.1 POSITIONNEMENT THEORIQUE : LES RESEAUX PHYSIQUES MASSES-INTERACTIONS COMME UN FORMALISME GENERIQUE, PROMETTEUR ET FONDAMENTAL POUR LA CREATION SONORE ET MUSICALE	29
2.1.1. SIMULATION PHYSIQUE, SONS DE SYNTHESE ET CREATION MUSICALE - UNE ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DU « POURQUOI » DES MODELES PHYSIQUES	29
2.1.2. SIMULATION PHYSIQUE ET CREATION MUSICALE – POSITIONNEMENT D'UNE RECHERCHE	33
2.1.3. SITUATION DU FORMALISME DES « RESEAUX PHYSIQUES » PARMI LES TECHNIQUES DE MODELISATION ET SIMULATION PHYSIQUES POUR LE SON ET LA MUSIQUE	36
2.2 L'ENVIRONNEMENT GENESIS	39
2.2.1. L'INVENTION ET LE POSITIONNEMENT D'UN NOUVEAU TYPE D'ENVIRONNEMENT DE CREATION	40
2.2.2. UN ENVIRONNEMENT POUR « PENSER L'INSTRUMENT » ; LA MODELISATION PHYSIQUE COMME UN PRINCIPE FONDAMENTAL POUR « PENSER LA MUSIQUE »	45

3 CONTRIBUTIONS A L'ENVIRONNEMENT LOGICIEL MIMESIS POUR LA CREATION DU MOUVEMENT ET DE L'IMAGE ANIMEE

49

3.1 POSITIONNEMENT : MODELISATION ET SIMULATION PHYSIQUE ET IMAGE ANIMEE, VERS UN « ART DU MOUVEMENT VISUEL » 49

3.2 L'ENVIRONNEMENT MIMESIS POUR LA SYNTHESE DE MOUVEMENT ET D'IMAGES ANIMEES 51

3.3 LA NOTION DE SIGNAL DE GESTE ET DE MOUVEMENT ET LE FORMAT *GESTURE AND MOTION SIGNAL* 53

3.4 PROBLEMATIQUE DE LA « MISE EN IMAGE » DANS LE CONTEXTE DES RESEAUX PHYSIQUES MASSES-INTERACTIONS : TECHNOLOGIES POUR LA MISE EN FORME DU MOUVEMENT, VERS UN HABILLAGE DES MOUVEMENTS A BASE TOPOLOGIQUE 56

4 VERS UNE SUITE LOGICIELLE GENERIQUE POUR LA CREATION AVEC LES RESEAUX PHYSIQUES

61

4.1 CONSIDERATIONS SUR LES ACTIVITES DE CONCEPTION ET DEVELOPPEMENT LOGICIEL DANS LE CONTEXTE ART SCIENCE TECHNOLOGIE 61

4.1.1. UNE RECHERCHE CENTREE SUR L'INVENTION ET LA CARACTERISATION DE NOUVEAUX « PARADIGMES LOGICIELS » 61

4.1.2. ÉLEMENTS METHODOLOGIQUES : LA « CREATION D'OUTILS POUR LA CREATION » 62

4.1.3. DE LA NECESSAIRE ARTICULATION ENTRE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT 63

4.2 POSITIONNEMENT DU PROJET *PHYSICS NETWORK SUIT* 64

4.3 UNE ANALYSE DE L'ACTIVITE DE MODELISATION 64

4.3.1. PROCESSUS DE MODELISATION PAR CONSTRUCTION « BAS-HAUT » ET PHASES DE MODELISATION 64

4.3.2. NOMBRE DE MODULES 65

4.3.3. REGULARITES ET IRREGULARITES DANS LES RESEAUX PHYSIQUES MASSES-INTERACTIONS 66

4.4 LE LANGAGE DE MODELISATION PNSL 67

4.5 UN SYSTEME ORIGINAL DE LABELLISATION POUR SOUTENIR LA NAVIGATION DANS LES MODELES COMPLEXES 68

4.6 VERS UNE INTERFACE MULTIMODALE GRAPHIQUE/TEXTUELLE POUR L'ACTIVITE DE MODELISATION 70

4.7 ANATOMIE DE LA SUITE LOGICIELLE POUR LA MODELISATION AVEC LES RESEAUX PHYSIQUES ET NOUVELLES VERSIONS DE GENESIS ET MIMESIS 72

4.8 VERS UN ENVIRONNEMENT MULTISENSORIEL - VERS UN ART MULTISENSORIEL ? 73

5 ETUDES AVEC ET POUR LE FORMALISME DES RESEAUX PHYSIQUES

75

5.1 TRAVAUX DE MODELISATION ET D'EXPERIMENTATION 75

5.2 ETUDE EN VUE D'UNE EVOLUTION DU FORMALISME CORDIS-ANIMA: LA QUESTION DES CHANGEMENTS D'ETAT DISCONTINUUS 77

6	CONTRIBUTIONS AUTOUR DE LA NOTION D'INTERACTION INSTRUMENTALE	81
6.1	PLATEFORMES ET ENVIRONNEMENTS LOGICIELS POUR LA SIMULATION TEMPS REEL SYNCHRONE	81
6.1.1.	DES CONTRAINTES PARMI LES PLUS HAUTS NIVEAUX D'EXIGENCE EN MATIERE DE CALCUL TEMPS REEL SYNCHRONE HAUTE PERFORMANCE	81
6.1.2.	ANALYSE, CHOIX ET MISE EN ŒUVRE D'ARCHITECTURES MATERIELLES POUR LA SIMULATION	83
6.1.3.	ENVIRONNEMENT LOGICIEL POUR LES SIMULATEURS ERGON_X	84
6.2	GENESIS TEMPS REEL : VERS UN MODELEUR-SIMULATEUR POUR LA CREATION INSTRUMENTALE	85
6.3	POSITIONNEMENTS RELATIFS A LA BOUCLE GESTE/SON EN INFORMATIQUE MUSICALE	86
6.3.1.	DU PARADIGME DU CONTROLE/COMMANDE A CELUI DE L'INTERACTION INSTRUMENTALE	86
6.3.2.	A PROPOS DU POSITIONNEMENT DES SYSTEMES HAPTQUES DANS LES SYSTEMES NUMERIQUES SONORES INTERACTIFS	88
6.3.3.	ENJEUX DES APPLICATIONS SONORES ET MUSICALES POUR LE DOMAINE DE L'HAPTQUE	90
6.4	TRAVAUX THEORIQUES DANS LE CADRE DU RESEAU EUROPEEN ENACTIVE INTERFACES	91
6.4.1.	CONTEXTE	91
6.4.2.	L'EXEMPLE DE L'AXE MULTIMODALITE VS MULTISENSORIALITE : VERS DES INTERFACES <i>ENACTIVES</i> OU <i>MULTISENSORIELLES</i> EN VIS-A-VIS DE L'UNICITE DE LA SENSORI-MOTRICITE HUMAINE	92
7	PERSPECTIVES : TECHNOLOGIES LOGICIELLES DE LA MODELISATION, DE LA SIMULATION ET DE L'INTERACTION MULTISENSORIELLES INSTRUMENTALES POUR LA CREATION	95
7.1	CONSTATS	95
7.2	AU DELA DES CADRES DISCIPLINAIRES ETABLIS : TECHNOLOGIES LOGICIELLES POUR L'INTERACTION ET LA CREATION MULTISENSORIELLES INSTRUMENTALES	96
7.2.1.	INSTRUMENTALITE, MULTISENSORIALITE ET CREATION ARTISTIQUE	97
7.2.2.	RECADRAGES	97
7.3	QUELQUES AXES DE TRAVAIL	100
7.3.1.	ELEMENTS DE PROBLEMATISATION DANS LES ETATS DE L'ART DES DOMAINES CONCERNES	100
7.3.2.	PERSPECTIVES EN MATIERE DE RECHERCHE TECHNOLOGIQUE ET D'INNOVATION	103
8	ANNEXES	113
8.1	REFERENCES CITEES	113

1 Introduction et contexte

1.1 Préambule

Il existe un lien fécond entre la recherche, l'innovation et la création artistique. L'art et la création suivent des démarches souvent parallèles à celles du chercheur et, avec leurs exigences propres, sont en situation de constituer un puissant stimulant pour la recherche et l'innovation. Réciproquement, l'histoire des arts témoigne de nombreux cas où le processus créatif s'est nourri de connaissances scientifiques ou de technologies innovantes. À l'heure des technologies de l'information et de la communication, ces influences réciproques se trouvent encore renforcées. Ainsi, un nouveau domaine d'activité a-t-il émergé, se structurant progressivement dans la société autour des points de rencontre entre l'art, la science et la technologie : le domaine Art-Science-Technologie [AST.98].

Mes travaux de recherche se situent dans ce domaine. Ils se sont déroulés au sein de deux structures qui œuvrent à un programme commun : le laboratoire Ingénierie de la Création Artistique (ICA) de l'Institut Polytechnique de Grenoble et l'Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression (ACROE), conventionnée par le Ministère de la Culture. Il s'agit d'une recherche à forte dimension technologique, pour laquelle la création artistique est à la fois un ferment, un guide et le premier champ d'application visé.

Ma motivation pour des travaux de recherche dans le domaine Art-Science-Technologie s'est forgée au long de trois parcours parallèles : un parcours d'instrumentiste musical avec l'apprentissage et la pratique du violoncelle ; un parcours d'auditeur découvrant les machines sonores et le son numériques ; un parcours scientifique et technologique, au cours de mes études d'ingénieur. Ces parcours se recouvraient dans le temps, mais ne se croisaient guère. En particulier, pensais-je, le monde de la pratique instrumentale et celui des « nouveaux sons » issus du numérique, pour être tous deux riches, ne pouvaient par principe pas « s'entendre ».

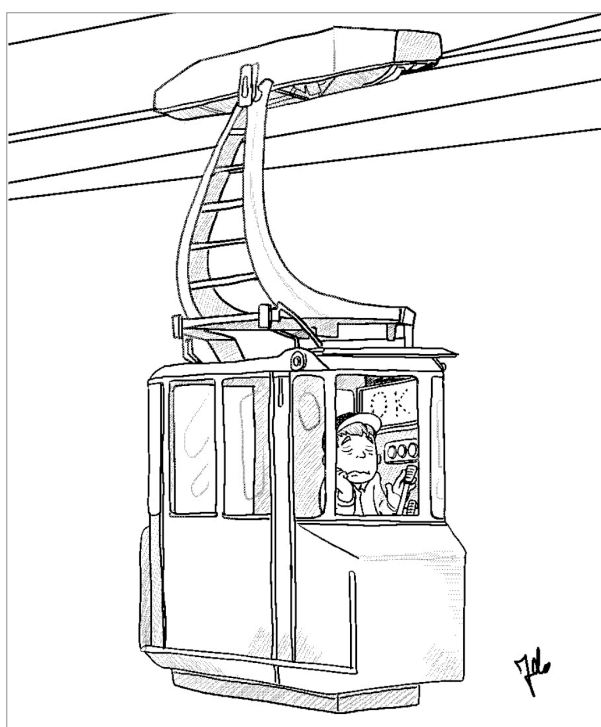
C'est au contact des enseignants du DEA Acoustique, Traitement du signal et Informatique Appliqués à la Musique (ATIAM, alors DEA national, accueilli à l'IRCAM) que j'ai pris conscience de l'intérêt d'une recherche à la jonction entre art, science et technologie. En particulier, au cours du stage de fin d'étude qui a finalisé à la fois ce DEA et mes études d'ingénieur, Claude Cadoz, co-fondateur de l'équipe ICA-ACROE, a transmis ses réflexions et celles de l'équipe quant à une possible explication du *pourquoi* du schisme que je ressentais entre jeu instrumental et sons numériques et quant à une voie, un *comment*, permettant d'espérer le réduire. Quelques 17 années plus tard, c'est au sein de ce groupe de recherche ICA-ACROE que se déroule ma carrière de chercheur... et que je participe à l'explicitation du *pourquoi* et à la mise en œuvre du *comment*.

Depuis les origines de l'informatique dans les années 50, la machine numérique a progressivement amélioré ses capacités d'échange avec l'être humain. Environnée de transducteurs visuels, sonores et gestuels, elle est désormais *interactive*, c'est à dire qu'elle répond à nos sollicitations corporelles par des phénomènes perceptibles élaborés au cours d'un calcul « temps réel ».

La recherche sur les dispositifs et métaphores de l'interactivité est actuellement extrêmement vivace dans plusieurs domaines relevant des sciences et technologies de l'information : interaction personne-système, réalités virtuelles, informatique musicale, informatique graphique, haptique, etc. Par ailleurs, comme il se devait, cette recherche scientifique et

technologique s'est déroulée de concert avec des travaux et questionnements artistiques. Synthétiseur numérique sonore, performances vidéo, sculpture virtuelle, scènes artistiques de réalité virtuelle interactive, installations interactives... l'ordinateur interactif s'est développé en grande partie grâce au champ artistique et, réciproquement, a indubitablement ouvert des perspectives inédites à la création.

Mais cette interactivité, qui désormais nous environne et marque nombre de pratiques artistiques, ne nie-t-elle pas, à un niveau essentiel, certaines de nos capacités d'interaction et d'expression ? La « machine numérique interactive » peut-elle être considérée comme un nouvel « instrument » de création, dont il serait légitime de comparer les qualités expressives avec celles des instruments traditionnels – que ceux-ci soient musicaux (violon, clarinette, piano...) ou visuels (pinceau du peintre, burin du sculpteur, ...) ? Réunit-elle les conditions nécessaires à un jeu réellement « instrumental », à fort pouvoir expressif, dans lequel l'instrumentiste et l'instrument formeraient un tout indissociable et l'instrument serait une prolongation véritable de l'être qui l'anime ? Que lui manque-t-il encore ?



Commande et (heureusement !) contrôle¹

Dans le contexte musical, pour commencer, considérons brièvement une situation interactive qui, bien qu'étant extrêmement simplifiée, s'inscrit néanmoins dans le paradigme de la machine numérique interactive : celle dans laquelle un sujet utilise un lecteur musical - de nos jours, par exemple, un lecteur MP3². En appuyant sur l'icône « lecture » de son écran tactile, il déclenche la lecture d'un son qui va s'avérer, sans aucun doute, tout à fait « musical ». En contrôlant le volume, la balance, les effets de salle ou d'égalisation, il module le rendu sonore. Peut-on dire, cependant, que ce sujet « joue de » son lecteur MP3 ?

La situation change bien sûr radicalement si l'on remplace le lecteur par un système relevant des nouvelles interfaces de jeu musical, par exemple un système MIDI. Mais jusqu'à quel point ?

Constatons tout d'abord qu'aujourd'hui encore nombre des *expandeurs* en charge de transformer le signal MIDI événementiel en signal sonore, en particulier parmi ceux qui relèvent du haut de gamme, reposent encore sur les principes du *sampling* et non pas sur ceux de la synthèse. C'est le cas, par exemple, des meilleurs « pianos numériques ». Lorsqu'une touche, même « à toucher lourd », est enfoncée, le son que l'on entend est élaboré au moyen d'une superposition de signaux sonores choisis dans une banque de sons préenregistrés. Cette superposition est certes finement contrôlée, et la banque de son peut être très vaste, de sorte que le signal sonore résultant peut-être remarquablement « réaliste ». Mais un tel système peut être analysé en continuité avec l'exemple du lecteur MP3 : notre sujet peut certes désormais commander le déclenchement paramétré d'une succession de sons ; mais il s'agit bien toujours d'un *déclenchement*, suivi d'un *contrôle*.

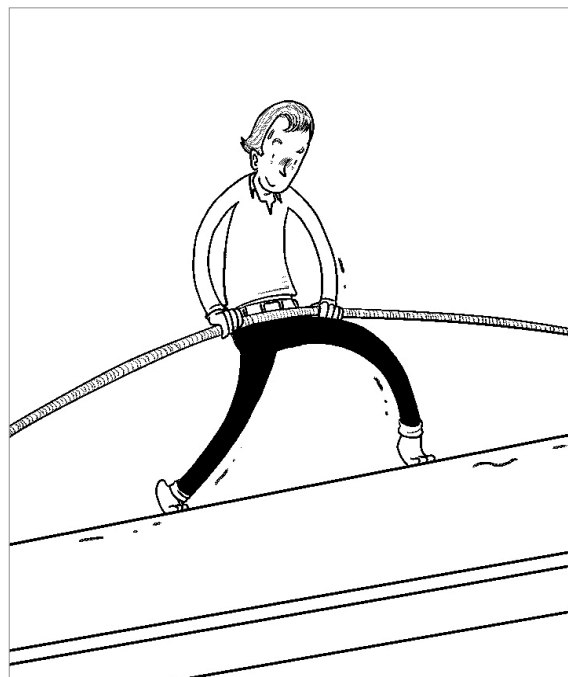
¹ Mes remerciements à J-Do pour les deux dessins de ce préambule <http://www.j-d0.com/>

² Cet exemple et l'argumentaire sont empruntés à Jean-Claude Risset, qui les discutait brièvement durant ses cours de DEA ATIAM.

Substituons, alors, un synthétiseur numérique au principe du *sampling*. Diminuons les latences et augmentons les bandes passantes des communications gestuelles. Environnons le système d'un ensemble de contrôleurs divers offrant chacun une ergonomie spécifique : molettes, potentiomètres, surfaces tactiles, capture du mouvement, objets tangibles, suivi de l'œil, détection de formes encéphalographiques, etc. Permettons, de plus, que le musicien puisse construire à volonté le lien de contrôle (le *mapping*) entre son geste et la dimension du son de synthèse qu'il va interpréter, de telle sorte qu'il puisse agir dans le temps de la performance sur toutes les dimensions du signal sonore : hauteurs, sonie, timbres, attaques, positionnements des sources dans l'espace et plus généralement tous les effets sonores imaginables : réverbération, écho, de *wah wah*, *flanger*, distorsion, etc. – ou encore, chose inédite, certaines dimensions formelles ou « compositionnelles » de l'œuvre. Ces situations musicales, qui mettent en jeu des technologies de plus en plus élaborées, confèrent au musicien la possibilité de façonner la « pâte sonore ». Elles offrent, c'est chose incontestable, de nouvelles et innombrables possibilités de diversification du son, et ouvrent de nouveaux champs à la musique...

... mais il n'en reste pas moins qu'avec elles le musicien demeure, vis-à-vis du signal musical ainsi généré, dans une relation de déclenchement, de commande ou de contrôle. Elles ne donnent pas place à cette prise de risque permanente qu'un instrumentiste jouant d'un instrument acoustique expérimente dans son corps. Elle ne lui permettent pas d'être dans une interaction intime avec la matière, un combat avec la matérialité de l'instrument, sur le fil du possible. Le jeu, c'est notre conviction, ne peut alors que difficilement espérer rivaliser en profondeur expressive (et en frisson pour l'auditeur !) avec celui d'un chanteur, d'un violoniste, d'un guitariste (acoustique ou électrique) d'un clarinettiste ou d'un pianiste...

... et cette machine numérique interactive, en se fondant sur des transferts et traitements d'informations symboliques, nie une partie des capacités humaines – ces capacités que Claude Cadoz et le groupe ACROE-ICA appellent « capacités instrumentales ».



Sur le fil du possible ?

Il existe, nous semble-t-il, une différence de nature, un schisme qu'il nous faut bien considérer comme fondamental, entre l'instrument mécano-acoustique et la machine numérique interactive. Et, si l'on se limite au spectre des technologies contemporaines de l'interactivité, il semble bien qu'on se heurte par principe à une impossibilité. Pour parvenir à franchir ce pas, il faudrait ici procéder à un changement de paradigme. Il faudrait ouvrir sur un nouveau modèle qui prendrait corps dans une nouvelle catégorie de technologies, permettant de passer de *l'interactivité* à *l'interaction*, d'une relation de *contrôle* à une situation de *couplage instrumental*. De passer de la *machine numérique interactive* à la *machine instrumentale*.

Le principe des *instruments augmentés* nous semble, en tant que chercheur et instrumentiste mais aussi en tant que simple auditeur, être une voie pour permettre de bénéficier des potentiels des systèmes numériques, tout en garantissant la conservation de l'essence de l'interaction instrumentale. Il consiste à augmenter un instrument traditionnel au moyen de capteurs et de processus de synthèse et de traitement numériques. Cette approche « mixte » permet tout d'abord au musicien de s'appuyer sur sa maîtrise de son instrument. Plus important à nos yeux, elle garantit que le cœur du phénomène sonore adressé à l'auditeur conserve son origine dans

l'instrument mécano-acoustique. Elle garantit que le message musical reste porteur des qualités inhérentes à une interaction instrumentale véritable. Le défi, alors, consiste à modifier le signal sonore originel au travers de processus numériques contrôlés de diverses manières, tout en se gardant de dénaturer sa nature instrumentale, sans détruire sa puissance expressive.

Les axes de recherche initiés et emmenés par le groupe ACROE-ICA adoptent dans leurs aspirations un positionnement différent pour aborder la question de l'instrumentalité dans le contexte des technologies numériques.

Ces axes ont été positionnés par Claude Cadoz dès ses premiers textes programmatiques entre 1975 et 1977, en lien avec les co-fondateurs du groupe ACROE-ICA Jean-Loup Florens et Annie Luciani [Cadoz, Florens 78, a et b]. La *relation instrumentale* est posée comme une situation de référence maintes fois éprouvée, une composante essentielle des capacités d'interaction de l'homme avec son environnement. En ce qui concerne la création, l'importance de l'instrumentalité pour la production de phénomènes perceptibles produits par synthèse, que ce soient des sons ou des images, est soulignée. L'étude et le questionnement de la relation instrumentale est alors une préoccupation constante, en particulier sous le prisme des transformations induites par les sciences et technologies de l'information. C'est sur ces bases ainsi posées, que le groupe assemble progressivement les éléments d'une machine informatique pour la création dans l'objectif de créer les conditions d'une relation instrumentale « véritable » autour des technologies numériques.

Nous résumons les positionnements conceptuels, scientifiques et technologiques du groupe dans la section suivante. Mais avant de conclure ce préambule, deux remarques s'imposent encore.

Tout d'abord, constatons que les fondations des travaux du groupe ont été introduites au milieu des années 70, c'est à dire *avant* le développement intensif des technologies de l'interactivité, de la simulation interactive et de ce qui est nommé aujourd'hui la réalité virtuelle. A ce titre, le parcours proposé dans ce préambule, qui positionne ces travaux au regard des technologies et usages *actuels*, n'est pas respectueux de l'histoire des idées. Il constitue un « après coup ».

Ensuite, le lecteur pourra avoir remarqué que nous avons rapidement axé ce préambule sur le contexte de la musique. Deux raisons y ont contribué. Tout d'abord, compte tenu de mon parcours, la notion « d'instrument de musique » me tient particulièrement à cœur. Ensuite, et plus essentiellement, si j'en crois les retours que j'ai pu avoir lorsque j'ai eu l'occasion de présenter mes travaux, la situation de jeu instrumental *musical* demeure un archétype particulièrement parlant pour illustrer la notion d'instrumentalité. Mais cet accent sur la musique est restrictif : le groupe, de part ses objectifs et sa structure, aborde l'instrumentalité et ses technologies de façon bien plus générale : pour la sculpture, pour l'image animée par exemple – et plus généralement « en tant que telle », qu'elle soit envisagée dans le cadre d'une situation artistique ou dans celui de toute autre situation (travail artisanal de la matière, soudure, chirurgie ou télé-opération par exemple). J'aurai l'occasion dans les chapitres 3 et 4 de ce mémoire de développer quelques implications du concept et des technologies de l'instrumentalité dans les domaines de la création visuelle et des réalités virtuelles, domaines dans lequel j'ai eu l'opportunité de m'investir.

Quoi qu'il en soit, ma motivation essentielle pour des travaux de recherche au sein du groupe ACROE-ICA tient à la conviction, née dès mes premières confrontations au programme et à ses fondateurs, que les principes qui articulent ce programme sont à même de provoquer le « changement de paradigme » ci-dessus évoqué, en permettant à l'instrumentiste d'investir, enfin, toute la richesse de ses capacités réelles d'expression instrumentale autour de l'ordinateur. A la lumière des résultats obtenus et des perspectives ouvertes, cette motivation reste entière.

1.2 Contexte scientifique et technologique du groupe de recherches

Cette section positionne quelques-uns des éléments, de nature conceptuelle, scientifique ou technologique qui, avant même mon arrivée ou depuis mon arrivée, sont au cœur du programme du groupe de recherche ICA-ACROE. L'objet de ce parcours est essentiellement de situer « l'écosystème » dans lequel notre contribution à ce programme s'est déroulée. Aussi, ce parcours est-il volontairement court. Le lecteur intéressé pourra se référer à la littérature citée.

1.2.1. Etude et caractérisation de la relation instrumentale. Fonction ergotique du geste instrumental.

L'étude et la caractérisation de la « relation instrumentale » est l'un des axes de travail du groupe depuis sa constitution, en particulier sous l'impulsion de Claude Cadoz [Cadoz et al.81], [Cadoz et al.84] [Cadoz.94], [Cadoz.99a] [Cadoz.99b].

Une première observation est que la relation instrumentale est par essence multisensorimotrice. Elle fait intervenir trois boucles : celles qui vont du geste à la perception visuelle et auditive et celle portée par le canal gestuel.

Le canal gestuel est complexe : il est, par nature, bidirectionnel, portant une action motrice et, de façon indissociable, sollicitant la perception tactilo-proprio-kinesthésique³ de l'opérateur [Cadoz.94]. Sa caractérisation a donc reçu une attention particulière.

Parmi toutes les approches visant à établir une typologie des gestes, la typologie du geste instrumental proposée par C. Cadoz [Cadoz.94] a pour intérêt d'être opératoire en termes de catégorisation des dispositifs instrumentaux. Elle se fonde pour cela sur le critère essentiel de l'échange énergétique entre l'homme et l'instrument. Trois fonctions du canal gestuel sont distinguées :

1. La fonction *épistémique* est convoquée lorsque le sujet cherche à acquérir par son geste une connaissance sur son environnement ; c'est le cas par exemple lorsqu'on caresse une surface pour en estimer la texture, qu'on explore un visage, qu'on estime le poids d'un panier garni...
2. La fonction *sémiotique* est convoquée lorsque le sujet vise par son geste à émettre un contenu informationnel à destination de son environnement, humain ou vivant ; c'est le cas par exemple lorsqu'on indique une direction à suivre, lorsqu'un chef d'orchestre dirige ses musiciens, ou lorsqu'un musicien s'adresse, par son jeu, à un auditoire.
3. Enfin, la fonction *ergotique* est convoquée lorsque le geste a pour objet de modifier l'environnement du sujet. C'est le cas par exemple lorsqu'un sculpteur manie son burin ou qu'un instrumentiste met une corde en vibration.

Le geste instrumental met en œuvre ces trois fonctions : « connaître », « faire connaître », « transformer ».

Le néologisme « ergotique », du grec *εργος* (énergie), adresse le fait que la fonction ergotique du geste est portée par un échange énergétique entre l'homme et son environnement :

« Ce qui caractérise l'action motrice, la main en train de travailler, c'est qu'elle est en prise directe avec la matière, qu'elle peut la modeler, la transporter, l'usiner, la briser.... Elle lui communique non pas de l'information, mais de l'énergie, elle applique des forces, des déformations et des déplacements aux objets et ces derniers lui résistent de diverses manières, lui renvoyant parfois une part de cette énergie. » [Cadoz.94].

Le critère de l'échange énergétique conduit Cadoz à structurer le geste instrumental en trois catégories : sélection, modification et excitation [Cadoz.94]. Les gestes de sélection et de

³ Le sens tactilo-kinesthésique regroupe la perception tactile (sensibilité de la peau) et la perception des efforts (cellules nerveuses afférentes des muscles).

modification ne mettent en jeu, dans le cas général, qu'un faible échange d'énergie. En revanche, le geste d'excitation nécessite par principe un échange énergétique entre l'instrumentiste et l'instrument. C'est en effet par ce geste que s'effectue l'apport d'énergie que l'instrument transforme en phénomène acoustique (instrument de musique) et/ou visuel (geste du sculpteur).

Une hypothèse fondatrice est alors que le geste d'excitation et la fonction ergotique du geste instrumental sont constitutifs de capacités d'expression humaines essentielles :

« (...) ce qui est particulièrement essentiel à propos du geste instrumental, c'est que c'est précisément parce qu'il est ergotique qu'il est aussi efficacement informationnel. C'est parce qu'il est matériel, fondé sur un échange énergétique contraint par des spécificités dynamiques, morphologiques, articulatoires qu'il atteint de telles performances expressives. »
[Cadoz.93]

L'importance de la fonction ergotique du geste instrumental, en particulier en situation de création, s'analyse suivant plusieurs dimensions. Elle est essentielle pour que l'instrument puisse être intériorisé, puisse être vécu comme une extension du corps et des organes de perception et d'action, comme une « seconde nature » [Luciani.04b] [Luciani&Florens.07]. Elle participe à la lisibilité du geste dans les phénomènes générés. Elle porte un fort pouvoir expressif : les contraintes imposées par la mécanique de l'instrument et la qualité ergotique de l'interaction gestuelle sont des éléments essentiels à l'expressivité [Cadoz.94].

Suivant ces analyses, le programme de recherche pose comme essentielle la nécessité de rendre possible le « geste ergotique » si le but est de parvenir à une véritable situation instrumentale avec les technologies de l'information et de la communication. Notons cependant qu'il ne s'agit pas de recréer à tout prix une situation instrumentale « traditionnelle » mais bien de *pouvoir bénéficier du potentiel inédit de l'ordinateur sans renoncer à l'acuité de nos capacités naturelles d'action et de perception, et par-là même d'expressivité.*

Dans l'objectif de parvenir à une machine numérique « instrumentale », le groupe ACROE-ICA a progressivement introduit un ensemble de concepts et conçu une famille de technologies, que nous situons dans le paragraphe suivant.

Dans la continuité de ces analyses théoriques, le groupe conduit des travaux expérimentaux dans le domaine des sciences cognitives afin de questionner le concept d'instrumentalité - [Luciani et al.09] [Luciani et al.12_#⁴], etc. Ces travaux s'appuient sur les technologies instrumentales conçues, dont le haut niveau de qualité permet une maîtrise remarquable des conditions expérimentales. Ils apportent progressivement la preuve expérimentale de la pertinence des analyses théoriques et des solutions technologiques du groupe autour de la notion d'instrumentalité.

Pour conclure ce paragraphe, citons à titre d'exemple deux situations expérimentales mises en œuvre par le groupe qui à nos yeux montrent la pertinence du positionnement adopté, ne serait-ce qu'intuitivement, dès lors qu'on les « prend en main », ou même qu'on observe les traces visuelles ou sonores de l'interaction :

- Le système de la « marionnette numérique jouée au moyen d'un système haptique » (A. Luciani, A. Habibi, S. Jimenez, 1990)⁵. Dans ce système, le modèle physique de la marionnette est peu complexe et le rendu visuel, constitué de points et de traits, est remarquablement simpliste. Pour autant, le rendu visuel est très parlant. Il rend « lisible » le geste de l'instrumentiste, et plus encore le couplage physique (ergotique) qui se crée entre l'instrumentiste et la marionnette durant la performance. C'est ce qui rend expressive cette situation par ailleurs simple.

⁴ Les références post-fixées par un # sont celles dont je suis co-signataire.

⁵ <http://acroe.imag.fr/mediatheque/videotheque/marionnette/marionnette.html>

- Dans le domaine sonore, l'expérience dite du « doigt sur la glace » me semble également remarquable. Cette expérience repose sur le calcul temps réel d'un modèle physique geste/son à nouveau très simple. L'intérêt de l'expérience réside dans le fait que le sujet est couplé par son geste à la structure simulée, au moyen d'un système à retour d'effort. Cette situation conduit à des sons frappants de « profondeur ». Les qualités du couplage dynamique homme-instrument sont immédiatement audibles dans le son. La continuité énergétique du geste au son est une évidence lorsqu'on « prend en main » le système. Qui plus est, elle « saute aux oreilles » lorsque, devenus auditeurs, on en écoute les sons résultants.

1.2.2. Transducteurs haptiques à retour d'effort. La famille des Transducteurs Gestuels Rétroactifs

Dans la chaîne amenant l'ergotécité du geste instrumental, le premier principe technologique qu'il est nécessaire de considérer est celui des transducteurs gestuels à retour d'effort, appelés plus fréquemment aujourd'hui « transducteurs haptiques ». En autorisant une maîtrise de la corrélation entre deux quantités duales, force et position, au niveau du point de contact instrumentiste/transducteur, le principe des transducteurs gestuels à retour d'effort permet seul, en effet, d'envisager d'adresser la bidirectionnalité de l'interaction gestuelle, de simuler un échange énergétique entre l'instrumentiste et l'instrument simulé et ainsi de réaliser un couplage du sujet et de l'environnement virtuel [Cadoz et al.81] [Cadoz et al.84] [Luciani et al.05_#] [Cadoz.07].

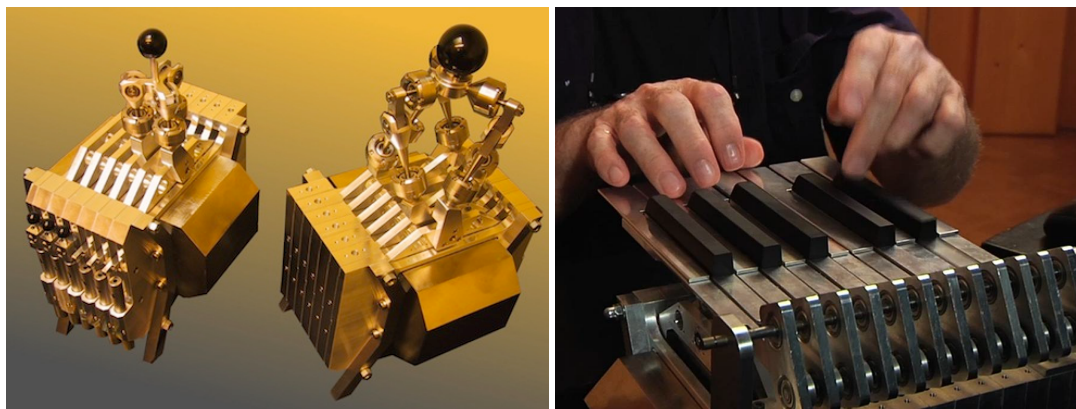


Figure 1 : Trois exemplaires de la troisième version du Transducteur Gestuel Rétroactif TGR conçu par le groupe, ici avec divers adaptateurs morphologiques (en anglais « end effectors »).

Le groupe de recherche a ainsi été parmi les pionniers des systèmes à retour d'effort pour les réalités virtuelles, en entreprenant dès les années 70 la conception d'une famille de Transducteurs Gestuels Rétroactifs (TGR) [Cadoz et al.90b] [Luciani et al.94] [Florens et al.04_#]⁶. Dans le contexte des transducteurs gestuels à retour d'effort, cette technologie se distingue par sa prise en compte de plusieurs propriétés du geste manuel : encombrement, variabilité morphologique, propriétés dynamiques.

Trois de ses caractéristiques essentielles sont :

- sa modularité, un dispositif pouvant présenter autant de degrés de liberté à retour d'effort que le nécessite la tâche considérée grâce à la technologie du « moteur en tranche » ©.

⁶ Ces systèmes sont aujourd'hui commercialisés par la société ERGOS Technologies, filiale de l'ACROE.

- sa capacité à présenter diverses ergonomies au moyen d'une panoplie d'adaptateurs morphologiques interchangeables (sticks 3D ou 6D, pinces, clavier, morphologie archet...) [Florens et al.04_#].
- ses remarquables propriétés dynamiques : résolution, bande passante, puissance électro-mécanique notamment en régime transitoire.

1.2.3. Simulation « basée physique » et plateformes de calcul « temps réel dur synchrone »

Un transducteur à retour d'effort échange avec un ordinateur deux types de signaux : des signaux issus de capteurs de position, portant donc une information homogène à une position, et des signaux contrôlant la puissance de l'effecteur, assimilables à un contrôle de force⁷. En regard des nécessités du transducteur à retour d'effort, le calcul numérique a pour rôle de générer « en temps réel » une consigne de « force » en réponse à une entrée « position ».

A priori, n'importe quel type de calcul peut être envisagé pour ce faire. Toutefois, le recours à un calcul de nature physique, ou, pour utiliser un terme devenu courant en réalités virtuelles, en informatique graphique et en informatique musicale, à une simulation « basée physique » des propriétés mécaniques d'un corps modélisé, trouve ici une évidente justification.

Par ailleurs, de façon générale, la réalisation du couplage entre, d'une part, le sujet manipulant le transducteur et, d'autre part, l'objet simulé, *via* un transducteur haptique à retour d'effort, nécessite que la puissance mécanique $P = \vec{F} \cdot \vec{V}$ qui signe ce couplage soit très finement contrôlée. En conséquence, la corrélation entre le signal montant « de position » et le signal descendant « de force »⁸, au travers du calcul de simulation, doit être parfaitement maîtrisée.

Dans cette situation, une contrainte essentielle pour la plateforme de calcul numérique est celle des latences entre entrées gestuelles et sorties gestuelles, sonores et visuelles du calcul [Luciani et al.05_#] [Luciani et al.09]. En particulier, la latence entre entrées et sorties gestuelles ne doit pas excéder un certain seuil, sous peine de rompre le couplage gestuel. On est ainsi conduit à mettre en œuvre une architecture temps-réel synchrone qui garantisse que la transduction des signaux montants et descendants soit faite à cadence fixe. Ainsi, le temps disponible pour le calcul d'un pas de simulation et l'ensemble des communications de signaux entre ce calcul et les transducteurs, en particulier le périphérique gestuel, est contraint. L'ensemble doit tenir dans une fenêtre temporelle inférieure à la période d'échantillonnage – c'est ce que le groupe qualifie de $T_{\text{Simulation}}$ [Cadoz et al.90a] [Cadoz et al.93].

Notons que les limites de la latence entre entrées et sorties en deçà desquelles il deviendrait impossible de qualifier « d'instrumentale » une situation multisensorielle interactive sont encore objet d'étude. Néanmoins, pour qu'une telle étude puisse être conduite avec sérieux, encore faut-il disposer d'une plateforme expérimentale de simulation qui permette de travailler au plus haut niveau d'exigence, avec une qualité métrologique, quitte à être amenés à dégrader sciemment et de façon contrôlée ses performances.

La fréquence de simulation est choisie nécessairement au delà d'un certain seuil pour permettre la corrélation des signaux au niveau du périphérique gestuel et tenir compte de la bande passante de ces signaux, notamment en ce qui concerne les transitoires - par exemple pour parvenir à simuler l'entrée en contact de l'ongle du sujet avec une surface dure ou avec un angle aigu. Ce seuil en fréquence a été repoussé plusieurs fois par le groupe au cours de son histoire. Il est également toujours objet d'étude. Par ailleurs, signalons que puisque parmi les phénomènes simulés peuvent apparaître des signaux à fréquences audio, a minima une partie du calcul doit être effectuée à la fréquence du signal numérique sonore – typiquement au minimum à 44.1 KHz [Luciani et al.05_#].

⁷ Ce dans le cas où le transducteur à retour d'effort fonctionne en « mode impédance » : capteur de position, effecteur de force. Certains systèmes fonctionnent en « mode admittance » : mesure de la force, et asservissement de la position.

⁸ Ou l'inverse si le transducteur fonctionne en mode admittance.

Comme nous le verrons, ces diverses contraintes placent la simulation multisensorielle instrumentale parmi les contextes applicatifs les plus exigeants dans le domaine *du calcul temps réel dur synchrone haute performance*. Le groupe a réalisé plusieurs plateformes de simulation au cours de son histoire. A titre d'exemple, la dernière en date est composée d'un ordinateur hôte équipé d'un système d'exploitation temps-réel et d'une carte co-processeur DSP, dotée de convertisseur numérique-analogique et analogique-numérique connectés au système haptique. Le calcul de simulation synchrone peut alors, dans certains cas, être réparti entre le processeur central et le co-processeur. On associe ainsi la réactivité du co-processeur à la puissance de l'unité centrale.

1.2.4. Système CORDIS-ANIMA, formalisme des réseaux physiques masses-interactions pour la modélisation et la simulation des phénomènes dynamiques à l'échelle de la sensorimotricité humaine.

Le groupe ACROE-ICA est parmi les tous premiers à avoir introduit la notion de modélisation et de simulation physique pour le son, l'image et les réalités virtuelles. En la matière, il porte le principe des réseaux physiques masses-interactions⁹, inspiré de la physique de Newton. Ce principe est unifié et standardisé dans le formalisme CORDIS-ANIMA, introduit dans les années 80 et en constant développement depuis lors [Cadoz.79] [Cadoz et al.90a] [Luciani et al.91] [Cadoz et al.93].

CORDIS-ANIMA est à la fois un langage modulaire (en ce sens qu'il offre une formulation axiomatique de la physique de Newton et définit un ensemble d'éléments et de règles de combinaison), un système de représentation constructiviste (en ce sens qu'il supporte et structure les activités de modélisation par construction de modèles conformes au formalisme), un système de simulation (en ce sens qu'il spécifie précisément un ensemble d'algorithmes physiques élémentaires ainsi que l'organisation séquentielle du squelette des calculs), et un ensemble de logiciels (en ce sens qu'il prend corps dans des moteurs de simulation).

Dans la mesure où ce mémoire rend compte de travaux qui se sont appuyés sur le formalisme et ont parfois contribué à son extension, nous synthétisons brièvement ses principes essentiels dans les figures 2, 3 et 4.

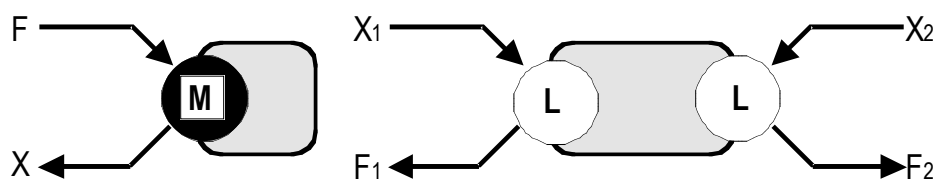


Figure 2 : Points de communication [M] et [L] et modules <MAT>, points matériel, et <LIA>, élément de liaison.

⁹ Les termes « réseau physique masses-interaction », que nous utiliserons dans ce mémoire, sont directement inspirés des termes « réseau Newtoniens » proposé relativement récemment par A. Luciani [Luciani.04]. Notons que d'autres appellations sont utilisés suivant les communautés scientifiques concernées et l'époque, notamment : « approche masses-interactions », « modèles physiques particuliers » ou « à constantes localisées ». Notons également que l'approche ne se confond ni avec les « systèmes masses-ressort sur maillage », ni avec le procédé d'analyse et calcul numériques des « différences finies », ni avec les « systèmes de particules » utilisés en Informatique Graphique. Elle est, comme nous le verrons, plus générique.

CORDIS-ANIMA repose sur deux types de composants élémentaires physiques duaux : les <MAT>, points matériels supportant le principe inertiel, et les <LIA>, éléments de liaison déterminant une interaction physique entre deux <MAT>.

Entre <MAT> et <LIA> circulent dans des directions opposées deux types de variables duales, l'une de nature extensive (position) et l'autre de nature intensive (force). Cette communication inter-modules est opérée au travers de points de communication bidirectionnels. Un <MAT> possède un point de communication de type [M] par lequel entre des forces et sort une position ; un <LIA> possède deux points de communication de type [L] par lesquels entre une position et sort une force. Les règles de connexion spécifient qu'un point [L] n'est connecté qu'à un seul point [M] et qu'un point [M] peut être connecté à plusieurs points [L]. L'algorithme d'un <MAT> a pour fonction d'élaborer une position en sortie à partir de la somme des forces qui se présentent sur son point de communication [M] – en accord avec le principe Newtonien de superposition des variables intensives. L'algorithme d'un <LIA> a pour fonction d'élaborer deux forces d'égale intensité et de signe opposé - conformément au principe d'action-réaction – à partir des positions qui se présentent sur ses points de communication [L].

Pour tenir compte du fait qu'un phénomène mécanique peut s'analyser en considérant un nombre variable des dimensions de l'espace, la dimension des signaux circulant au travers des points de communication peut varier de 1 à 3. Cette dimensionnalité correspond à la dimension de l'espace de simulation dans lequel sont calculés les comportements simulés des modules.

Au delà de la partition entre <MAT> et <LIA>, CORDIS-ANIMA introduit un ensemble de modules physiques élémentaires qui chacun modélise et simule un comportement élémentaire de la matière : comportement inertiel, comportement élastiques et visqueux linéaires ou non linéaires, par exemple. La figure suivante présente quelques-uns des types de modules physiques CORDIS-ANIMA, au moyen d'un diagramme inspiré des diagrammes de classe du formalisme UML.

Le choix et la spécification de la base des modules élémentaires – de la collection d'algorithmes – sont critiques en ce qu'ils déterminent la base fonctionnelle supportant l'activité de modélisation et la diversité des modèles que l'on peut construire. Il s'agit ici de disposer d'une base *complète*, c'est-à-dire recouvrant la totalité des phénomènes physiques auxquels on s'intéresse et *optimale*, tant relativement à l'efficacité du calcul (complexité théorique et pratique minimale) que relativement à l'activité de modélisation (recouvrements fonctionnels bien choisis, choix du module aisé en fonction des buts à atteindre, paramètres clairs et signifiants, etc.). Le travail visant la définition du cahier des algorithmes est toujours en cours.

Le formalisme spécifie également le squelette de calcul, c'est-à-dire l'organisation séquentielle de l'exécution des algorithmes des modules d'un modèle complet. Le squelette CORDIS-ANIMA est strictement synchrone. Il est organisé en deux phases : la phase [LIA], qui aboutit à la détermination de l'ensemble des forces circulant dans le réseau, et la phase [MAT] qui consiste à déterminer les nouvelles positions des <MAT>. Ce squelette synchrone peut être étendu au cas des modèles multifréquences et au contexte du calcul réparti. Ces extensions sont toujours objet d'études.

Figure 3 : une introduction à CORDIS-ANIMA, d'après [Cadoz et al.93].

Le principe de modélisation/simulation masses-interactions, tel que formalisé dans CORDIS-ANIMA, est à la fois issu du programme de recherche du groupe et fondateur de ce programme. Derrière son apparente simplicité, qu'incidemment on a pu parfois lui reprocher, mais qui en fait constitue l'une de ses qualités majeure, il offre une profondeur à même de structurer non seulement une réflexion et un programme de recherches, mais encore tout un nouveau champ d'activité dans le domaine art-science-technologie. Depuis son invention, il s'impose progressivement, au niveau international, comme l'une des voies d'approche majeures de la modélisation et de la simulation physique pour le son, l'image et les réalités virtuelles. L'étude de CORDIS-ANIMA, son extension et son positionnement dans les états de l'art des communautés concernées sont des préoccupations constantes pour le groupe. Nous relaterons certains de nos contributions en la matière dans ce mémoire.

Pour conclure ce paragraphe consacré à CORDIS-ANIMA, nous introduisons brièvement quelques unes des publications offrant une mise en perspective du formalisme.

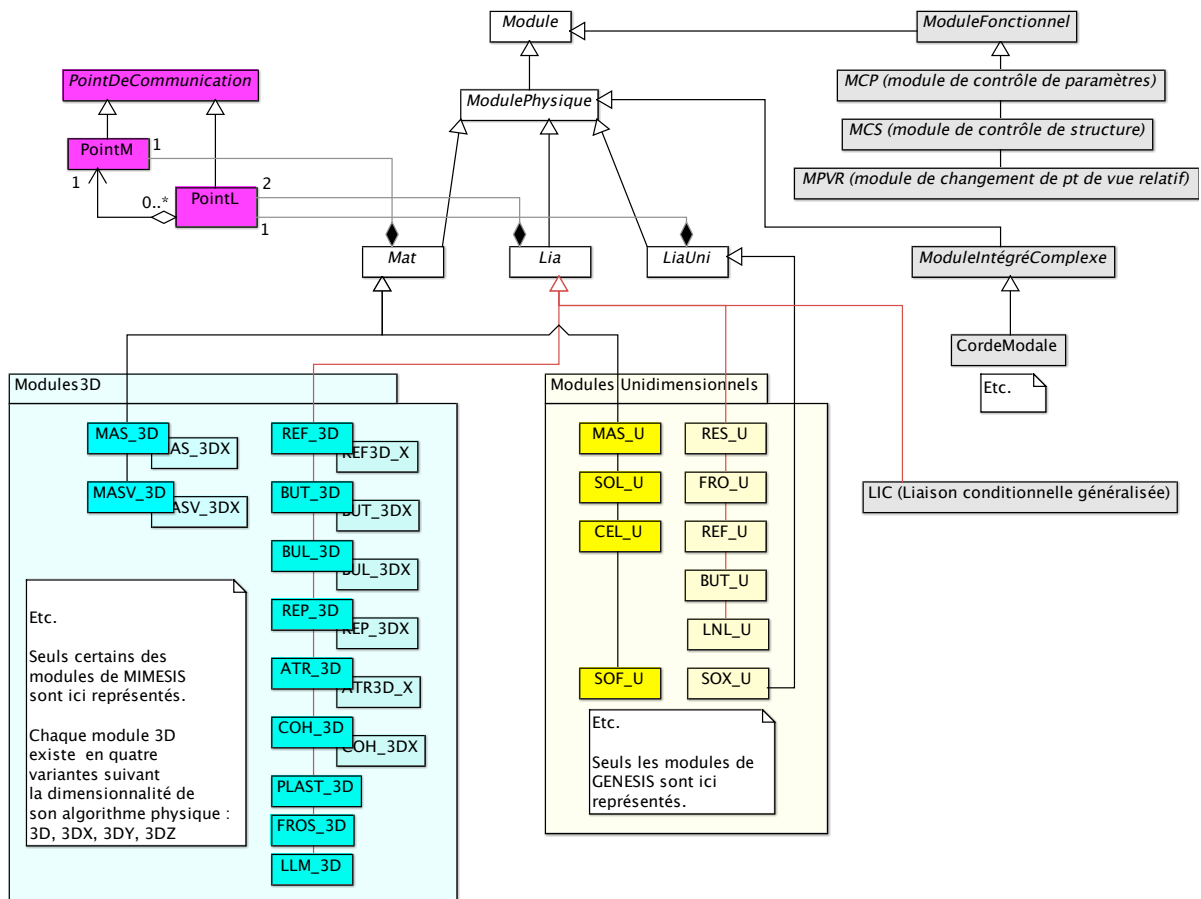


Figure 4 : Un diagramme UML des principaux modules CORDIS-ANIMA.

En jaune : modules unidimensionnels de l'environnement GENESIS (chapitre 2).

En bleu : certains des modules tridimensionnels de l'environnement MIMESIS (chapitre 3).

En gris : certains des modules envisagés dès [Cadoz et al.93] mais encore expérimentaux, dont la spécification est reprise dans le cadre du nouveau travail de formalisation actuellement en cours (cf. Perspectives, section 7.3.2).

Dans [Cadoz et al.90a] et [Cadoz et al.93], Cadoz et ses co-auteurs s'intéressent au caractère nécessairement discret de la communication d'informations entre un opérateur et un objet simulé par un ordinateur. Les points de communication [M] et [L], supportant chacun une communication bidirectionnelle d'informations duales (variable extensive de position, variable intensive de force), sont alors introduits, en tant que moyen minimal et nécessaire pour porter l'échange d'information entre la simulation et le transducteur. Le raisonnement s'appuie alors sur les principes de modularité et de généricité pour rechercher la forme externe *minimale* que doivent avoir des atomes élémentaires pour que leur combinatoire permette d'aboutir à des structures arbitrairement complexes. C'est ici que s'introduisent les catégories duales <MAT> et <LIA>, en tant que modules élémentaires respectivement à un point M et à deux points L, briques élémentaires seules à même de permettre un processus d'assemblage. Ainsi, le principe des « masses » (<MAT>, générant une position à partir d'une force) et des « interactions » (<LIA>, générant deux forces de signe opposé à partir de deux positions), ainsi que leurs règles d'assemblage, se trouve-t-il justifié du fait des nécessités technologiques de la transduction au niveau des périphériques haptiques – ce avant même qu'il ne soit question de modélisation ou de simulation physiques.

Dans [Luciani.04b] puis [Luciani.09] [Luciani.11], Luciani introduit le terme de « réseau Newtonien » - ou « réseau masses-interactions », que nous utiliserons incidemment dans ce mémoire. Le formalisme CORDIS-ANIMA est en effet positionné en tant que cadre formel *minimal et générique* formalisant, dans le contexte du calcul numérique, les principes de la physique Newtonienne sous la forme de *réseaux d'automates cellulaires fonctionnels basés sur des équations différentielles* d'ordre 0, 1 ou 2. En positionnant ces « réseaux Newtoniens » en regard d'autres types de réseaux (réseaux de Kirchhoff, réseaux de neurones, systèmes à base d'agents...), ces articles mettent en lumière le caractère très général CORDIS-ANIMA, « *système abstrait et formel de représentation par lequel on [peut décrire] (...) algébriquement la corrélation dynamique [existant] entre deux (et, partant, un nombre quelconque de) phénomènes dynamiques* ».

Dans ces articles, la référence à la notion de « réseau » signe deux autres propriétés :

1. le terme « réseau » s'oppose à la notion de « maillage » ;
2. il porte l'idée que le processus de modélisation est basé sur la construction d'un assemblage de composants (*bas-haut*), par opposition à un processus basé sur une discrétisation du temps et/ou de l'espace de « la physique » d'un corps (*haut/bas*)¹⁰.

Ainsi : « *Les modèles physiques tels qu'ils sont pratiqués dans le domaine scientifique et en particulier dans le domaine de la synthèse d'images restent sur le terrain de la mimesis. Ils cherchent avant tout à reproduire. C'est la raison pour laquelle ils ne sont guère considérés dans le champ des préoccupations artistiques. En revanche, les modèles physiques particuliers de type réseaux masses-interactions ont pour raison première d'être constructibles, ce qui est une condition nécessaire pour être la base d'un outil de création. Ainsi, au-delà de l'usage habituel du modèle physique pour atteindre un plus grand degré de réalisme, le paradigme de la modélisation physique masses-interactions est d'abord et avant tout un puissant formalisme pour modéliser des mouvements quelconques, réels ou imaginés, expérimentés et expérimentables, par l'artiste lui-même. Ils se présentent comme un à construire et donc s'inscrivent dans le champ de la liberté artistique* » [Luciani.11].

¹⁰ Incidemment, ces analyses illustrent le fait que le principe des réseaux physiques masses-interactions se distingue à un *niveau fondamental* d'autres approches courantes en informatique graphique ou en informatique musicale, telles que les maillages « masse-ressort », la méthode d'analyse numérique des différences finies, ou encore les systèmes de particules, approches auxquels il est souvent à tort associé mais qui, de fait, sont moins générales. Ce point, pour secondaire qu'il soit dans notre raisonnement, est essentiel en ce que la confusion a pu être forte, et l'est encore souvent dans les domaines scientifiques qui nous intéressent, nuisant à la compréhension de la portée de la « formulation réseau » [Luciani.11] de l'approche masses-interactions.

A titre d'exemple, si tout modèle dit « masse-ressort » peut bien sûr être exprimés dans le contexte des réseaux physiques, l'inverse n'est pas vrai. D'une part, un modèle masses-interactions ne résulte pas d'un procédé de discrétisation d'une forme spatiale mais d'un processus de construction ; d'autre part, l'approche masses-interactions inclut dans ses principes même la possibilité des interactions élastiques ou visqueuses non linéaires et la possibilité des interactions à distance. De même, si *certain*s modèles masses-interactions peuvent bien être comparés point par point à des algorithmes issus du procédé d'analyse numérique dit des « différences finies », ils s'en distinguent pour des raisons similaires. Quant aux « systèmes de particules » largement utilisés en informatique graphique pour des effets d'explosion par exemple, ils sont bien évidemment très différents en ce qu'ils n'accordent une place que tout à fait secondaire à la possibilité d'une influence entre particulaire et de sa modélisation. Là encore, les réseaux physiques sont par essence plus généraux.

1.2.5. Environnement logiciels pour la création avec la modélisation physique

Une quatrième catégorie de technologie à laquelle s'intéresse le programme du groupe est celle des environnements logiciels. L'environnement est le lieu de la médiation entre l'outil et l'utilisateur. Il est le support de la mise en œuvre des processus de son utilisation et doit donc en particulier :

- servir de support à l'activité de modélisation avec CORDIS-ANIMA, c'est-à-dire rendre possible la modélisation de l'instrument virtuel qui sera ensuite simulé ;
- permettre l'articulation des phases de modélisation et de jeu instrumental ;
- supporter l'activité de création dans son ensemble.

Il doit ainsi constituer une représentation (une *réification*) de ces processus.

L'environnement nécessite alors l'invention et le positionnement de principes d'environnements logiciels, de fonctionnalités et d'ergonomies nouveaux. C'est dans sur cette *problématique de l'environnement de modélisation* que se situe notre principale contribution au programme du groupe à ce jour ; nous y consacrons les parties 2, 3 et 4 de ce mémoire.

1.2.6. Simulation interactive et multisensorielle d'objets physiques

Ainsi, autour de l'objectif fédérateur d'une machine numérique d'interaction instrumentale multisensorielle, le programme du groupe a conduit à travailler sur quatre technologies et thèmes essentiels [Cadoz et al.03b_#] :

- Les systèmes haptiques à retour d'effort,
- Le calcul temps-réel dur synchrone à haute performance,
- Le formalisme de modélisation et de simulation des « réseaux physiques »,
- Les environnements logiciels

La figure 5 schématise l'organisation de cette machine encore en devenir.

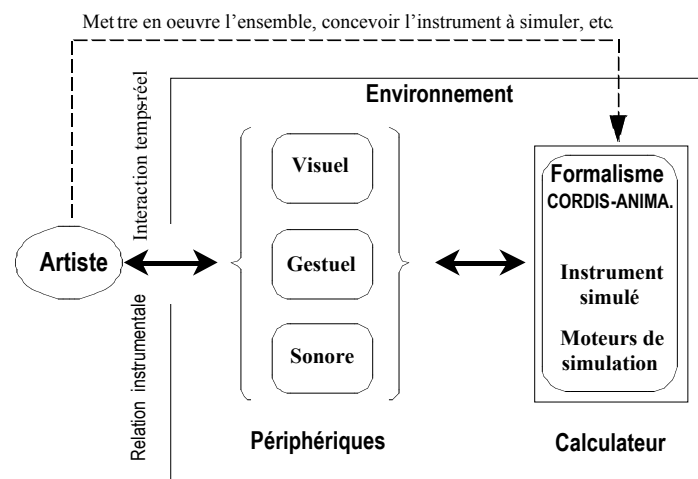


Figure 5 : Plateforme de calcul temps-réel, formalisme, moteur de simulation temps réel synchrone, périphériques et environnement logiciel.

On comprendra certainement que cet objectif et l'ensemble des travaux qu'il appelle nous semblent dessiner des perspectives fécondes et permettre la structuration de voies de recherche originales et prometteuses pour les arts et la création numériques et, plus traditionnellement, dans les domaines scientifiques de l'informatique graphique, de l'informatique musicale, de l'haptique et des réalités virtuelles.

Pour terminer cette section consacrée au contexte scientifique et technologique de nos travaux dans le groupe ACROE-ICA, signalons que nous avons privilégié un angle d'approche de nature principalement technologique, dans la mesure où cet éclairage nous semble le plus propice pour situer notre participation aux travaux du groupe. Le lecteur intéressé trouvera dans [RapActQuad.10] [RapAct.12_#] une présentation plus complète et plus équilibrée des activités du groupe. Il pourra y trouver notamment, plus abondamment commentée, la liste suivante des autres axes de recherche embrassés par le groupe

- Modélisation physique (savoir-faire en modélisation).
- Simulation interactive, multisensorielle, instrumentale.
- Technologies des transducteurs gestuels à retour d'effort.
- Plateformes du calcul temps réel dur synchrone.
- Systèmes de modélisation et de simulation physique (ou « basée physique »).
- Environnements pour la création avec la modélisation et la simulation physiques.
- Capture, traitement, édition du signal d'interaction gestuel.
- Problématique « *Vers une modélisation de la relation forme - mouvement pour l'animation et les arts visuels* » introduisant un principe de multimodalité dans l'image elle-même »
- Problème inverse : « *rétropropagation de l'analyse de l'effet sonore vers l'identification de la cause musicale* »
- Recherches artistiques et création. Arts numériques, musicologie, histoire de l'art...
- Analyses des processus de création : aspects sensoriels, perceptifs, cognitifs, créatifs
- Analyse cognitive de la situation instrumentale et des artefacts produits au moyen de l'instrumentalité et de la simulation.
- Evaluation des dispositifs d'interaction instrumentale.
- Pédagogie de la modélisation et de la simulation.
- Positionnements théoriques des principes et technologies portés par le groupe.

1.3 Positionnement général de mes travaux

Parmi les voies explorées par le groupe, les travaux de recherche dont il est question dans ce mémoire se sont pour l'essentiel centrés sur la problématique des environnements de modélisation pour la création.

Ces travaux sont traversés par un questionnement sur les relations liant *modélisation et simulation physiques* et *création* ou, plus spécifiquement, sur la possibilité et l'intérêt fondamental *d'appuyer une activité de création sur la modélisation*.

Nous avons abordé ce thème sous l'angle de l'informatique appliquée (en anglais, les « *computer sciences* »), en adoptant une approche technologique et une méthodologie générale que l'on pourrait qualifier de « démonstration par l'outil ». Nos travaux ont ainsi été animés par un objectif premier consistant à inventer et réaliser une nouvelle famille *d'environnements logiciels pour la création avec les réseaux physiques masses-interactions*. Cette famille prend corps dans des modeleurs-simulateurs adressant divers usages.

Il s'agissait tout d'abord, avec ces logiciels, que l'artiste soit à même de mettre en place et d'organiser des processus de création complets et innovants autour de l'activité de modélisation physique. Il s'agissait ensuite de caractériser ces processus de création et d'identifier les principes logiciels permettant leur mise en œuvre. Enfin, il fallait que les outils ainsi créés supportent l'étude puis la démonstration de la pertinence d'une telle démarche.

De façon concomitante, nous avons produit une analyse de la nouveauté :

- d'abord en contribuant à la réflexion sur les voies par lesquelles l'utilisateur-créditeur est amené à modifier profondément ses processus de création lorsqu'il met en œuvre ces environnements logiciels ;
- ensuite en positionnant ces environnements logiciels dans l'histoire scientifique et technologique des outils de création et dans les états de l'art des communautés scientifiques concernées.

A l'origine, ces recherches se sont inscrites dans le domaine de l'Informatique Musicale, avec nos travaux de thèse sur l'environnement GENESIS pour la création sonore et musicale. Elles se sont poursuivies par une incursion en informatique graphique, avec notamment une contribution à la réalisation de l'environnement MIMESIS pour la création d'images animées. Plus récemment, avec la suite logicielle *Physics Network*, nous refondons les innovations apportées par GENESIS et MIMESIS dans un système logiciel commun, unifiant ainsi notre propos. Ce faisant, nous préparons la voie à de nouveaux questionnements qui, au delà des frontières disciplinaires scientifiques et artistiques usuelles, et en lien avec le concept d'interaction instrumentale porté par le groupe, ambitionnent de positionner la modélisation et la simulation physiques masses-interactions parmi les principes génériques fondamentaux pour adresser la multisensori-motricité humaine.

Ces travaux s'inscrivent en conséquence dans plusieurs domaines scientifiques :

- l'informatique musicale, mon domaine « historique »
- l'informatique graphique
- les réalités virtuelles
- l'haptique et le retour d'effort
- Et plus généralement, ce que nous pourrions appeler « la modélisation constructiviste » et « la simulation sensorielle ».

Par ailleurs, pour mener à bien ces travaux, nous avons progressivement assemblé, au sein du groupe, une connaissance de l'état de l'art et un savoir-faire sur deux thématiques qui nous étaient essentielles : le génie logiciel (conception et implantation de systèmes logiciels complexes, et méthodologies afférentes) et l'interaction personne-système (IHM : conception et implantation de systèmes interactifs et d'interfaces utilisateur et méthodologies afférentes).

Une bonne maîtrise de ces deux domaines était chose nécessaire pour réaliser les modeleurs-simulateurs dont il est question. Ceux-ci constituent en effet des systèmes logiciels de taille et de complexité conséquente. De plus, étant interactifs, ils appellent une analyse précise des moyens logiciels et des ergonomies supportant l'activité de l'utilisateur.

De façon réciproque, nos travaux sur les environnements de modélisation et de simulation nous ont conduit à formuler un certain nombre d'innovations dans ces mêmes domaines du génie logiciel et de l'interaction personne-système. Nous en ferons parfois état dans ce mémoire. Enfin, la connaissance et le savoir-faire acquis dans ces domaines on pu ensuite nourrir des travaux autres que ceux consacrés aux modeleurs-simulateurs, dont certains seront également évoqués dans ce document.

En faisant maintenant référence à la nomenclature thématique de la 27ème section CNU¹¹, nos travaux s'inscrivent essentiellement dans l'index :

- 94 : Synthèse d'image (et de son), réalité virtuelle ou augmentée

Toutefois, de part la nature des connaissances et savoir-faire convoqués et la nature des productions scientifiques et technologiques auxquels ils ont conduit, ils renvoient également à d'autres entrées de cet index. Tout d'abord :

- 70 : Génie logiciel et programmation
- A0 : Communication homme-machine et A2 : Communication homme-machine (interaction, dialogue, interface)

et, dans une moindre mesure :

- D0 : Modélisation-simulation pour les systèmes complexes et D1 : formalisme de modélisation
- 63 : Systèmes critiques et embarqués, temps réel

Dans une exploration transversale, l'ensemble des résultats de nos travaux se présente sous quatre aspects :

1/ avec GENESIS, MIMESIS et la suite logicielle *Physics Networks*, nous avons contribué à l'invention d'une nouvelle famille d'environnements de création, qui (1) fonde l'acte créatif sur l'activité de modélisation physique et (2) s'appuie pour cela sur le formalisme des réseaux masses-interactions. Ces environnements sont caractérisés par ce que nous appelons un *paradigme logiciel* : des fonctionnalités, des caractéristiques en matière d'architecture logicielle, des ergonomies nécessaires, adéquates, nouvelles et spécifiques, ainsi que des processus d'utilisation nouveaux – ici de modélisation et de création – qui leur sont propres.

Nous avons spécifié les fondations technologiques de ces logiciels et les avons mis en œuvre jusqu'à un degré de finalisation suffisant pour leur conférer le statut d'outil véritable, permettant leur utilisation *in situ* et leur dissémination. Nous avons par ailleurs contribué à l'analyse de leurs usages et au positionnement de leurs spécificités dans l'histoire des outils de création.

Cette famille de logiciel figure désormais aux côtés d'autres catégories fondamentales de logiciels pour l'artiste.

2/ Ce faisant, nous avons permis et accompagné la démonstration progressive du fait que l'activité de construction de modèles physiques (le fait de concevoir ses propres modèles physiques à l'aide d'un outil de construction par blocs physiques) est une activité de création qui présente une pertinence profonde pour l'artiste. Cette pertinence s'inscrit dans les résultats obtenus (dans les qualités des phénomènes sensibles produits et des œuvres générées avec ces processus de création) mais aussi, de façon plus originale, et sans doute plus essentielle, dans l'activité elle-même (dans le fait de manipuler des concepts et des modèles physiques en vis-à-vis d'un propos ou d'un questionnement artistique).

Dans le champ de l'informatique musicale, nous avons en outre accompagné la découverte et l'expérimentation d'un processus de création musicale radicalement nouveau, qui montre que les « modèles physiques » peuvent être pertinents bien au delà de la simple synthèse du phénomène sonore. Avec ce processus, que C Cadoz a appelé la « composition de (avec les) modèles physiques » la création musicale, y compris dans ses dimensions compositionnelles et formelles, devient le fruit d'une « pensée causale » qui met en œuvre une écriture musicale au moyen de modèles physiques.

11 <http://cnu27.iut2.upmf-grenoble.fr/Qualifications/Nomenclature-2012.html>

Enfin, notons que ces diverses contributions ont été initiées et sont encore produites à un moment :

- où une tendance majeure est de considérer que la modélisation physique ne peut être appréhendée que par des scientifiques spécialistes
- où les systèmes logiciels supportant une activité de *modélisation* et destinés à l'artiste sont encore remarquablement rares, et où, parmi eux, peu rencontrent un public.

Nos travaux en la matière ont donc pris le contrepied de l'état de l'art et progressivement contribué à la preuve de l'intérêt de notre approche.

3/ De façon corollaire, nous avons contribué, auprès des diverses communautés scientifiques concernées, à la démonstration de ce que le formalisme des réseaux masses-interactions pour la modélisation et la simulation physiques constitue une approche majeure pour la génération de phénomènes dynamiques perceptibles, pour l'interaction gestuelle – et, partant, pour la création. Les diverses propriétés de ce formalisme, telles que sa généralité, sa modularité, sa calculabilité ou son utilisabilité, lui confèrent un degré de généralité que nous pensons comparable à celui d'autres formalismes fondamentaux déjà établis dans le domaine – comme, par exemple, celui des processus modulaires de traitement du signal pour la synthèse de sons ou celui des modèles géométriques pour la modélisation de la forme visuelle.

4/ Enfin, en nous appuyant sur nos travaux de conception de systèmes logiciels interactifs complexes et de réalisation d'outils logiciels pour la création, nous avons contribué à un certain nombre d'autres axes d'étude : travaux de positionnement théorique, de modélisation et d'expérimentation, de réalisation d'autres logiciels, de formalisation des principes des réseaux physiques masses-interactions, etc.

Pour faire suite à cette présentation générale situant nos travaux dans les divers contextes de recherche, les chapitres 2 à 6 vont développer et mettre en perspective ces quatre ensembles de résultats et les publications associées, dont on trouvera une liste en annexe à ce mémoire.

Dans le chapitre 2, nous nous intéressons au contexte de l'informatique musicale en résumant nos travaux sur l'environnement GENESIS et en les situant dans l'univers des techniques de modélisation physique et des outils de création sonore et musicale.

Le chapitre 3 est consacré aux travaux relatifs aux environnements de modélisation et de simulation pour la création d'images animées et de mouvement. Il y sera question de l'environnement MIMESIS et des technologies logicielles qui l'environnent auxquelles nous avons contribué.

Le chapitre 4 situera nos recherches actuelles et nos résultats plus récents relatifs à la suite logicielle *Physics Networks*. S'appuyant sur nos travaux antérieurs autour de la notion d'environnement de modélisation et de création, cette suite logicielle vise une nouvelle étape pour ce type d'environnements.

Le chapitre 5 synthétise quelques-unes des études auxquelles nous avons collaboré autour de CORDIS-ANIMA, d'une part en modélisation, d'autre part dans l'objectif d'adjoindre de nouvelles fonctionnalités au formalisme des réseaux physiques masses-interactions.

Le chapitre 6 introduit nos contributions en lien avec la notion et la situation d'interaction instrumentale et avec les technologies correspondantes : travaux de positionnement théorique notamment réalisés au sein du réseau d'excellence européen *Enactive Interfaces*, contributions à l'étude et à la réalisation de plateformes de simulations temps-réel dur synchrone...

Finalement en nous appuyant sur l'expérience et les résultats acquis, et en suivant le fil conducteur des *technologies logicielles pour l'interaction multisensorielle instrumentale*. Nous exposons, dans le chapitre 7, les diverses perspectives que nous entrevoyons pour la poursuite de nos travaux.

2 L'environnement logiciel GENESIS pour la création sonore et musicale avec les réseaux physiques masses-interactions

2.1 Positionnement théorique : les réseaux physiques masses-interactions comme un formalisme générique, prometteur et fondamental pour la création sonore et musicale

Responsable :	C. Cadoz
Chercheurs impliqués :	C Cadoz, N Castagné, O Tache
Temporalité :	Depuis 1998.
Contextes des travaux	Doctorant, Ingénieur de Recherches puis Maître de Conférences. De 2004 à 2007 : dans le cadre du projet européen Enactive Interfaces
Publications :	[Castagné&Cadoz.03_#] [Castagné&Cadoz.04a_#] [Castagné&Cadoz.04c_#] [Castagné&Cadoz.05_#] [Castagné.07b_#] [Castagné.07c_#] [Castagné.07e_#] [Castagné&Cadoz.09_#] [Castagné et al.09_#] [Cadoz et al.11_#]

2.1.1. Simulation physique, sons de synthèse et création musicale - une analyse bibliographique du « pourquoi » des modèles physiques

L'approche historique de la génération des sons numériques s'appuie sur la synthèse du signal sonore. Elle est encore aujourd'hui la plus usitée. Elle consiste à générer, à sculpter, à manipuler les caractéristiques du signal (fréquence, timbre, attaque....) au moyen de techniques de synthèse du son (synthèse additive, soustractive, FM, granulaire...).

Avec la simulation physique (on devrait dire peut-être « simulation de comportements mécaniques », mais nous conserverons les termes consacrés par la littérature), au contraire, on se préoccupe non plus directement du signal, mais de la modélisation et de la simulation de phénomènes dont les corps mécaniques producteurs de sons sont le siège – simulation de laquelle on extrait le signal sonore finalement généré. Les processus d'analyse et de modélisation sont déplacés des effets (le signal sonore et son contenu) vers les causes (le corps sonore et son comportement), que ces causes soient observables dans un instrument réel ou supposées dans un instrument hypothétique.

Le recours à la modélisation et à la simulation physiques pour la génération des sons se développe largement en recherche depuis les années 90. L'engouement suscité par les modèles physiques est fort. Mais que peut-on attendre, ou plus précisément qu'espèrent chercheurs et musiciens du changement profond de principe associé au passage de la « synthèse » à la « simulation » ? Dans le cadre de mes travaux de thèse puis après la thèse, dans l'objectif de positionner les voies qu'empruntent nos propres travaux, nous avons produit une analyse de la littérature de l'Informatique Musicale relativement au principe de la « synthèse de sons par modèle physique » (on dirait aujourd'hui plutôt de la modélisation et de la simulation physique pour le son et la musique) en accordant une attention particulière aux attentes des auteurs, affichées ou sous-entendues. Ce travail d'analyse et de positionnement a été publié en informatique musicale et en acoustique [Castagné&Cadoz.03_#] [Castagné&Cadoz.04c_#] [Castagné&Cadoz.05_#] [Castagné.07b_#] [Castagné&Cadoz.04a_#] [Castagné&Cadoz.05_#] [Cadoz et al.11_#]. Une courte synthèse en français de ce travail est disponible [Castagné&Cadoz.09_#]. Nous en donnons ci-après une rapide relecture.

« Simuler pour connaître ; Connaître pour simuler »¹²

La littérature s'avère traversée par deux catégories d'attentes relativement aux modèles physiques et aux techniques supportant la modélisation et le calcul de simulation pour le son et la musique. En ayant recours au titre d'un article de C Cadoz [Cadoz.90a], on peut qualifier respectivement ces deux catégories par les termes « simuler pour connaître » et « connaître pour simuler ». Notons que cet article est antérieur à nos travaux ; notre étude bibliographique montre comment l'essentiel de la littérature se positionne essentiellement, encore aujourd'hui, suivant ces deux axes [Castagné&Cadoz.04a_#].

Dans le premier axe, la simulation physique, entendue comme « simulation de la mécanique des instruments et corps sonores », est essentiellement un moyen pour étudier cette « physique » particulière – moyen encore relativement nouveau, rendu accessible par l'arrivée des technologies numériques. Ainsi, on « simule » pour mieux « connaître ». Le modèle et la simulation sont alors un résultat de l'étude, mais aussi et d'abord un moyen pour la conduire : le modèle est envisagé comme une représentation de la connaissance produite, et la simulation comme un moyen d'évaluation de la pertinence de cette connaissance. Cette démarche n'est ni plus ni moins celle des physiciens de toute discipline qui utilisent le modèle pour vérifier ou extrapoler les lois physiques connues, dans des cas non solvables par les mathématiques (par exemple dans l'existence de fortes non linéarités).

Dans le second axe, tout aussi présent que le premier dans la littérature, les modèles physiques et la simulation sont envisagés comme un moyen parmi les plus prometteurs pour parvenir à recréer par synthèse les sons d'instruments réels. Il s'agit alors de s'appuyer sur une connaissance des mécanismes physiques en jeu pour pouvoir les « simuler » de façon réaliste.

Ces deux positionnements signent en commun l'existence d'un lien étroit entre les recherches sur la synthèse par modèles physiques et le domaine de l'acoustique. Les méthodologies et processus de modélisation adoptés sont en effet très profondément inspirés de ceux des acousticiens. Quelques traits caractéristiques le montrent :

1. Il s'agit essentiellement de modéliser un instrument acoustique (ou une famille d'instruments acoustiques), dans une recherche de « réalisme », selon la notion de « *one-shot model* » ou de « modèle spécifique », et non pas de proposer des voies génériques pour parvenir éventuellement à des sons nouveaux pour un usage musical ;
2. La science de l'acoustique et les équations physiques qu'elle produit sont des référents majeurs.
3. Le modèle numérique est souvent obtenu au moyen d'une méthodologie d'analyse numérique appliquée à un modèle issu des sciences physiques (de l'acoustique en particulier), à temps et espace continus. Ce modèle est considéré comme une représentation idéale de l'état de la connaissance sur les phénomènes en jeu.
4. L'évaluation des modèles est faite essentiellement en les comparant à l'instrument acoustique (ou à la famille d'instruments acoustiques) modélisé(e). De plus, pour l'évaluation de la qualité du modèle numérique, on analyse souvent la « divergence numérique » introduite par le calcul numérique.

Ce contexte et ce type de démarches signent bien le fait que les communautés de l'acoustique et de l'informatique musicale entretiennent toujours des liens privilégiés. Incidemment, nombre des publications ayant trait aux modèles physiques dans la conférence ICMC (*International Computer Music Conference*) ou dans le CMJ (*Computer Music Journal*) sont signés de chercheurs en acoustique.

A la base de ces approches, *une idée encore largement rependue est que la réalisation d'un modèle physique numérique devrait par principe s'appuyer sur les méthodes et cadres de pensée de l'acoustique*. Ainsi, il semble souvent sous-entendu qu'un modèle serait « physique » dans la

¹² Ces mots sont empruntés au titre d'un article de Claude Cadoz [Cadoz.90a].

mesure où il s'appuierait sur les méthodes et connaissances des sciences physiques – en l'occurrence de l'acoustique dans le cas des modèles sonores.

Certaines de nos publications ont alors visé à situer nos travaux en vis-à-vis de la prépondérance de l'acoustique lorsqu'il est question de création sonore par modélisation physique. Cette prépondérance est sans doute naturelle du fait de l'histoire de l'Informatique Musicale, mais elle présente, à nos yeux, le risque de limiter le potentiel réel de la simulation physique pour la création musicale [Castagné&Cadoz.04a_#].

Des algorithmes physiques pour des sons synthétiques de qualité : réalisme ou plausibilité ?

Dans ce contexte, il n'est pas étonnant que les modèles physiques ne soit le plus souvent envisagés que comme un moyen de parvenir à une reproduction fidèle de sons d'instruments acoustiques. Ainsi, pour certains, l'obtention de sons de synthèse réalistes constitue l'intérêt essentiel des algorithmes physiques. Il s'agit, certes, d'un intérêt majeur, très largement saluée dans la littérature :

« Compte tenu des réalités du marché de la synthèse sonore, dont l'un des moteurs essentiels est la recherche d'un plus grand réalisme des sons de synthèse (...), il n'est donc guère étonnant que les modèles physiques se soient d'abord répandus en tant qu'algorithmes de synthèse ou "qu'expandeur" (...). Ainsi, aujourd'hui, bon nombre des algorithmes de synthèse commerciaux haut de gamme font appel à des algorithmes "basés physiques" – à tel point que le recours à de tels algorithmes constitue un argument commercial » [Castagné&Cadoz.09_#].

Toutefois, il est tout aussi intéressant de noter que le recours aux modèles physiques pour reproduire de façon réaliste le son d'instruments acoustiques demeure dans la plupart des cas plus un souhait vertueux, un objet de recherches, qu'une réalité. En matière de recherche de réalisme, en effet, les techniques basées sur le *sampling*, qui consistent à construire le signal sonore à partir d'une banque de sons préconstituée par l'enregistrement d'instruments réels, sont toujours les plus usitées. C'est le cas par exemple pour les pianos numériques haut de gamme.

Mais, plus essentiel à nos yeux, envisager les modèles physiques sous le seul angle de la recherche de réalisme serait perdre de vue leurs intérêts fondamentaux. Ainsi citons-nous René Caussé dans mon mémoire thèse [Castagné.02-thèse_#] :

« Utiliser ces modèles de synthèse lors d'applications musicales pour imiter les instruments "réels" n'a certainement pas grand intérêt et en parodiant G. Hegel on peut dire que développer de tels instruments est probablement un travail superflu... un jeu présomptueux. L'imitation ne pouvant produire que des chefs-d'œuvre de technique, jamais des œuvres d'art' (Hegel, 1821, l'Esthétique) » [Caussé.90]

Fort heureusement, l'intérêt de la modélisation physique ne s'arrête pas là.

Lorsqu'il s'agit de qualifier la qualité perçue des sons générés par simulation de mécanismes acoustiques, au delà de l'idée restrictive d'une recherche de réalisme, le vocabulaire employé par la littérature est encore relativement peu précis. On peut y lire que les sons obtenus par simulation physique sont « plus réalistes », « plus riches », « plus organiques » ou « plus dynamiques » par exemple. Nous avons proposé le terme « plausible », au sens de « perçu comme pouvant avoir été produit par un système mécano-acoustique » :

« De façon plus générale, qu'ils modélisent un instrument réel ou qu'ils soient créés de toute pièce, les modèles physiques garantissent aux sons de synthèse une meilleure « plausibilité ».
La plausibilité physique des sons est une caractéristique essentielle : l'oreille, en effet, cherche à inférer à partir des sons qu'elle entend une cause physique possible, de sorte que, comme le souligne Jean-Claude Risset, "les timbres synthétiques ont plus de relief, ont une identité beaucoup plus marquée, plus robuste, lorsqu'on peut imaginer de quelle manière ils auraient pu être produits physiquement" [Risset.90].
Qui plus est, le caractère « plausible » des sons générés par les modèles physiques est robuste face aux variations. D'une part leurs paramètres permettent souvent d'agir sur des dimensions du son pertinentes pour l'audition. D'autre part, ils tendent à réagir correctement, entendons de façon plausible, en réaction aux sollicitations. En quelque sorte, ils déplacent l'origine des subtiles variations dynamiques responsables d'une partie de la vie du son depuis le flux de contrôle (nécessaire avec les approches traditionnelles de la synthèse basées sur le signal) vers le modèle lui-même. »
[Castagné.02-thèse_#]

Ainsi, selon-nous, ce qui constitue l'essence de la puissance des modèles physiques pour la génération de sons, ce n'est pas tant leur propension supposée au « réalisme » que leur ancrage dans certains mécanismes élémentaires propres aux structures mécano-acoustiques productrices de sons. Cet ancrage confère naturellement aux sons qu'ils génèrent une « plausibilité » plus importante que toute autre technique de synthèse, ce indépendamment du caractère « réaliste » des modèles et des sons considérés.

La modélisation, une activité de création ?

La modélisation s'entend, ici, comme l'activité consistant à concevoir ses propres modèles physiques et non pas seulement à les utiliser.

A cet égard, un troisième constat issu de notre analyse de la littérature est que la modélisation est très rarement envisagée comme relevant de l'acte créatif. Ainsi écrivions-nous dans [Castagné&Cadoz.09_#] :

« Un présupposé répandu est qu'un musicien souhaitera utiliser des modèles préexistants en bénéficiant de leur « réalisme », mais ne s'intéresse guère à la genèse de ces modèles. C'est sans doute juste pour certains usages (...) et sans doute la raison du succès des nombreux "plug in basés physiques" disponibles dans le commerce, qui implantent des algorithmes pré-conçus et encapsulés, dédiés à telle ou telle catégorie d'instruments » [Castagné&Cadoz.09_#]

On peut par ailleurs constater que peu de travaux visent à offrir à l'utilisateur - musicien la possibilité de concevoir ses modèles. La plupart des environnements de modélisation disponibles (bibliothèque C/C++, langages dédiés...) sont de fait davantage destinés à un usage par des scientifiques (informaticiens, acousticiens...) qu'à un usage par des musiciens. Et, dans les rares modélisateurs destinés au musicien, les briques de modélisation sont le plus souvent des modèles de structures vibrantes déjà construits, qu'il s'agit essentiellement de paramétrer et d'assembler entre eux.

Ainsi, peu de travaux font le double pari que l'utilisateur final (musicien, compositeur, plasticien...) est à même de mettre en œuvre un processus de modélisation physique et qu'un tel processus a un intérêt quelconque dans le cadre d'une activité de création artistique, musicale par exemple.

Corrélativement, lorsqu'on considère les usages du modèle physique en situation de création musicale, il apparaît que peu de créateurs sont auteurs de *leurs propres modèles*.

Nous avons montré, par exemple, que les musicologues ou technologues qui ont traité des rapports entre création et modèle physique ne se sont intéressés, pour l'essentiel, qu'à l'usage des modèles physiques par les compositeurs, ces modèles ayant été conçus préalablement par des

scientifiques de manière à permettre de jouer sur quelques paramètres. L'un des rares points suscitant apparemment un certain intérêt est de pouvoir jouer avec les limites du « réalisme » sonore. Ainsi, le centre d'intérêt des modèles physiques pour les usages compositionnels semblerait devoir se limiter aux qualités des sons obtenus grâce avec ce type de modèles. Ces études ne traitent finalement que de façon relativement marginale l'impact des modèles physiques sur le travail compositionnel. Elles questionnent rarement l'éventuel lien entre création musicale et modélisation [Castagné&Cadoz.09_#] [Castagné&Cadoz.04a_#]. Ainsi, il apparaît que la modélisation peine à s'installer dans les pratiques musicales : si le modèle physique est parfois utilisé par des musiciens, il n'est toujours pas – ou peu – « parlé ».

Or, ce constat ici formulé pour la modélisation physique ne semble pas pouvoir être fait eu égard à l'histoire de la synthèse par modèles de signaux.

Dès les prémices de la synthèse du signal sonore, en effet, les compositeurs et créateurs musicaux pionniers se sont rapidement intéressés à ces nouveaux procédés de création du son – ce même dans leurs aspects même les plus complexes. Un nouveau vocabulaire et un nouveau savoir faire se sont progressivement constitués, ainsi qu'une nouvelle façon de penser le son musical, autour, par exemple, des notions de fréquence, de spectre, d'attaque, de forme d'onde, etc. En parallèle, dès les tous débuts de la synthèse dans les années 50, les technologies modulaires de traitement du signal sonore ont été inventées. En la matière, de nombreuses propositions s'appuyant sur le paradigme du signal ont existé dès les débuts de l'informatique musicale (programmes Music-N) et continuent à se renouveler (Max-MSP et PureData années 1990 ; etc.). Aujourd'hui, les musiciens et la musique se sont appropriés profondément les technologies et techniques du paradigme du signal. Elles sont désormais enseignées et couramment utilisées par de très nombreux musiciens, au delà des recherches musicales et des musiques savantes.

Ainsi, de façon sans doute bien plus importante que la possibilité d'accéder à de nouveaux univers sonores via l'utilisation d'une bibliothèque d'algorithmes, la synthèse a ouvert sur la maîtrise du signal sonore lui-même. Avec la synthèse numérique des sons, la frontière entre substance et forme, entre son et organisation s'est réduite : le son est maîtrisé avec toute la précision requise pour une éventuelle nouvelle écriture. Ainsi, Jean-Claude Risset a-t-il écrit : « *Avec la synthèse, le compositeur peut "faire jouer le temps dans le son au lieu d'agencer des sons dans le temps"* », [Risset.99a].

Pourquoi les sciences, technologies et savoir-faire de la modélisation et de la simulation physiques ne provoqueraient-ils pas à leur tour une évolution de fond, à l'aune de celle qu'a marqué l'avènement de la synthèse numérique des sons ? Et, s'ils en ont le potentiel, comment peut-elle être accompagnée et comment la caractériser ?

2.1.2. Simulation physique et création musicale – positionnement d'une recherche

Dans ces mêmes publications, nous tentons d'avancer quelques pistes de réflexions permettant de questionner la situation historique de la modélisation physique, puis nous positionnons certains axes directeurs de nos travaux.

La situation historique de la modélisation et de la simulation physique en informatique musicale selon quatre pistes de réflexion.

Une **première piste** de réflexion a trait au risque, déjà évoqué, que porte la recherche unique du réalisme à laquelle les modèles physiques restent encore associés.

Il faut noter que, par un retour de balancier, cette recherche de réalisme vient en réaction aux possibilités infinies de sons inouïs ouvertes par la synthèse. Toutefois, si l'on veut promouvoir la modélisation en tant qu'activité de création, il est nécessaire de l'affranchir de la recherche

d'une reproduction du réel pour pouvoir plus librement l'envisager comme une porte vers de nouveaux mondes sonores, dont l'intérêt en terme de qualité sonore se trouve à un niveau bien plus fin et délicat à appréhender que celui de la comparaison au réel.

Une **seconde piste** a trait, à nouveau, à la prépondérance du domaine de l'acoustique dès lors qu'il est question de modélisation et de simulation physiques.

Le paradigme du signal est né en terrain vierge et de, ce fait, a du, mais aussi *pu*, inventer ses méthodologies, ses techniques, ses procédés d'évaluation ; et ces inventions se sont faites par la participation conjointe des technologues, des scientifiques et des musiciens.

A l'inverse, la modélisation physique hérite de l'histoire des sciences acoustiques. Tout en offrant un corpus de connaissance tout à fait remarquable et pertinent, l'acoustique impose également son héritage, notamment en matière méthodologique, et de fait sa réputation de science expérimentale d'un abord difficile. Il nous apparaît nécessaire de s'en affranchir au moins partiellement si l'on veut envisager l'acte de modélisation comme un processus créatif.

La **troisième piste** de réflexion a trait tout simplement au fait que la modélisation et la simulation sont apparues en informatique musicale dans un contexte où les approches « signal » de la synthèse étaient déjà fortement implantées et atteignent sans doute aujourd'hui leur apogée.

La conduite des recherches sur la modélisation et la simulation physiques ne peuvent donc échapper à la référence aux techniques, systèmes, pratiques et savoir-faire relevant du paradigme du signal, pas plus qu'elles ne peuvent échapper aux références à l'acoustique. Une tendance forte a alors été de les aborder comme une possible extension qu'il s'agirait d'incorporer dans les méthodes et outils usuels de la synthèse et du signal (qu'il soit sonore ou événementiel/MIDI). Ceci a été réalisé par exemple par l'adjonction, dans des environnements logiciels de type « signal », d'un certain nombre d'algorithmes et techniques déclarés « basés physiques », ou d'algorithmes dont une interprétation est possible sous l'angle de la physique.

Si une telle démarche a, bien sûr, sa pertinence, ne serait-ce que parce qu'elle porte la possibilité de faire bénéficier de la qualité sonore des modèles physiques dans le contexte de savoir-faire désormais courants, elle nous semble cependant présenter deux risques de confusion. Le premier est que soient mixés sans précaution algorithmes physiques et algorithmes signal, ou encore qu'un modèle physique soit envisagé comme une « boîte noire », certes délicate à maîtriser, mais *in fine* ne constituant qu'une nouvelle catégorie de bloc de synthèse du signal. Le second, qui en découle, est que soit plus fondamentalement masquée la transformation de principe que constitue le passage de la *synthèse* à la *simulation* et qu'on ne puisse prendre la pleine mesure les implications profondes de cette transformation.

Enfin, une **quatrième piste** de réflexion tient aux compétences nécessaires à la mise au point d'un modèle physique.

La conception d'un modèle physique est *par nature* plus complexe que la réalisation d'un modèle de signal. Une raison simple en est que la modélisation physique implique un niveau d'indirection supplémentaire par rapport au signal sonore que l'on veut *in fine* obtenir. A titre d'exemple, dans un modèle physique les divers éléments sont couplés et le phénomène sonore est émergent, alors que dans un « *patch* » de synthèse les blocs sont chaînés et le signal est construit pas à pas, progressivement.

Dès lors, pour beaucoup, la conception d'un modèle physique nécessiterait la manipulation d'équations complexes et de moyens de calcul numérique délicats et, qui plus est, fort éloignés de tout projet et de tout savoir-faire musical. Une idée qui apparaît de façon récurrente dans la littérature est en effet que la conception d'un modèle physique nécessite des compétences de nature technique ou scientifique, par principe éloignées des compétences et propos musicaux.

Ceci constitue, selon nous, un jugement *a priori*. Ainsi :

« De la même manière que les environnements de traitement du signal modulaire permettent de réaliser des modèles de traitement à très haut niveau sans que, par exemple, une connaissance de la transformée en Z ne soit indispensable, il est possible, comme nous pensons l'avoir démontré, d'envisager des systèmes permettant à un utilisateur final de concevoir des modèles physiques très complexes sans qu'il ne soit, par exemple, nécessaire de manipuler frontalement des équations non-linéaires ou des algorithmes complexes. Mais cela requiert bien sûr, outre la volonté d'y parvenir, que les technologies adéquates soient inventées » [Castagné& Cadoz.09] .

Résumé : positionnement d'une recherche technologique, scientifique et musicale

En ce qui concerne ce qu'on peut attendre des phénomènes sonores générés, nous proposons donc qu'à la recherche de réalisme (ou de fidélité, selon le terme de R. Caussé) soit résolument substitué le caractère de « plausibilité », de telle sorte que des modèles physiques même totalement « irréalistes » – faudrait-il dire irréalisables par des procédés mécano-acoustiques – conservent une capacité à stimuler avec finesse et pertinence ce que l'oreille musicale cherche et entend, grâce à leur appui sur des modèles de mécanismes élémentaires producteurs de sons.

En matière de processus de modélisation, nous défendons l'idée qu'un musicien est tout à fait à même de développer un processus de modélisation physique, même extrêmement complexe, en s'appuyant sur sa connaissance intime, « *embodied* », « enactée » de la physique des corps sonores au moyen d'une pensée physique, à la condition bien sûr que les technologies adéquates aient été développées et qu'elles lui soient accessibles. Plus généralement, nous proposons que la modélisation physique, c'est-à-dire l'acte de créer ses propres modèles, peut être envisagée comme une activité de création correspondant à des questionnements (des recherches) sonores et musicales, à tout le moins tout aussi musicalement pertinente que le savoir-faire développé avec le paradigme du signal.

En d'autres termes, et à titre d'exemple, nous défendons l'idée que des notions telles que l'inertie, la raideur, la viscosité, la tension, la percussion, le frottement (etc.), notions qu'embrasse la modélisation et la simulation, sont tout aussi pertinentes, si ce n'est plus pertinentes, que les notions de fréquence, de centroïde spectral, de bande passante, de filtres, de temps explicite (etc.) que porte le paradigme signal. Si les secondes sont aujourd'hui couramment pratiquées et en position dominante, il serait nécessaire et prometteur que les premières acquièrent toute leur place dans les langages de la musique numérique.

Enfin, nous défendons l'idée qu'il convient de se garder de deux écueils lorsqu'on veut envisager les modèles physiques pour la musique : celui qui consisterait à s'inscrire systématiquement dans les méthodologies de l'acoustique, et celui qui consisterait à vouloir *par principe* aborder la modélisation et la simulation dans la continuité stricte des acquis de la synthèse, en particulier comme une extension des technologies, environnements et procédés du signal.

Pour que ces ruptures dans le positionnement de la modélisation et de la simulation physique et dans les processus qui y ont recours puissent s'opérer, ou encore pour donner corps au changement de paradigme que porte la notion de simulation par rapport à la notion de synthèse, il était nécessaire qu'une rupture symétrique ait lieu dans les technologies. C'est cette nécessaire rupture technologique que nous avons adressée avec nos travaux autour de l'environnement logiciel GENESIS, rapportés dans la section 2.2, en fondant progressivement un nouveau paradigme d'environnement logiciel de création avec les réseaux physiques masses-interactions.

2.1.3. Situation du formalisme des « réseaux physiques » parmi les techniques de modélisation et simulation physiques pour le son et la musique

Les premiers sons de synthèse obtenus par simulation de la physique d'un instrument sont attribués à Hiller et Ruiz en 1971 puis à Cadoz quelques années plus tard. Tous deux eu recours à des algorithmes alliant des « masses » et des « interactions ». Leurs approches en la matière sont toutefois différentes :

- Ruiz et Hiller, adoptent une démarche analytique que l'on peut qualifier d'acousticienne et/ou de numérique. Ils partent de l'équation d'onde d'une corde vibrante à temps et espace continus et montrent comment un modèle numérique constitué de masses et de ressorts-frottements connectés en ligne permet de donner une approximation de sa solution algébrique par le calcul.
- Cadoz introduit quant à lui le formalisme modulaire CORDIS-ANIMA et adopte dès l'origine un processus de modélisation par construction. Chaque module est un modèle d'un certain comportement mécanique élémentaire (inertie, viscosité...). L'assemblage de ces algorithmes physiques élémentaires produit un modèle physiquement cohérent sans qu'il soit préalablement nécessaire de faire référence à une formulation mathématique à temps et espace continus.

Depuis ces premiers travaux, de nombreuses techniques de modélisation et de nombreux modèles ont été publiés. La modélisation et la simulation physique pour la synthèse de son ont pignon sur rue en recherche en informatique musicale depuis les années 90. Le travail de recherche et de développement reste intense, et l'engouement suscité par les modèles physiques est fort.

En partant de la littérature, nous avons produit une analyse et une mise en perspective des diverses techniques de modélisation et simulation physiques pour le son et la musique.

Cette étude a tout d'abord comporté un volet technique qui propose une catégorisation des diverses techniques employées et détaille chaque catégorie [Castagné.02-thèse, annexe 2_#]. Nous proposons de classer comme suit les techniques existantes :

- La démarche de l'acousticien, qui consiste à avoir recours à des processus divers d'analyse numérique pour, partant d'un modèle à temps et espace continu, parvenir à un algorithme calculable.
- Le concept masses-interactions ou « des réseaux physiques », sur lequel est fondé le formalisme CORDIS-ANIMA conçu et mis en œuvre à l'ACROE-ICA, suivant lequel un modèle est obtenu par assemblage de modules physiques élémentaires « masses » et « interactions » dans un réseau.
- La méthode dite de synthèse modale, suivant laquelle un modèle est défini par une collection de modes vibratoires (fréquence et viscosité modales) vus au travers d'une matrice de déformées modales qui représente l'importance de chaque mode aux points d'accès.
- La technique des guides d'ondes, suivant laquelle, par exemple, un modèle 1D est constitué d'une double ligne à retard dotée de pertes et dispersions aux extrémités et aux points d'accès.
- La représentation sous forme de boîtes « noires » de traitement du signal, suivant laquelle un modèle physique est envisagé comme un bloc doté d'entrées et de sorties, qu'il devient naturellement possible d'insérer dans un « patch » de traitement du signal. Dans cette approche, en général, une source de signal est couplée à un filtre numérique au moyen d'une fonction de rétroaction non-linéaire.

Au cours de nos travaux, il nous est apparu que ces différentes techniques de modélisation et simulation physiques ne sont pas du tout équivalentes lorsqu'il s'agit de permettre la conduite d'un processus de modélisation par un musicien [Castagné&Cadoz.03_#]. Dans l'objectif de mettre

en perspective les diverses techniques, nous avons produit une étude critique des techniques en regard des usages possibles.

Dans ce cadre, en nous inspirant de la démarche adoptée dans [Jaffe.95], nous avons proposé 10 critères d'évaluation comparée, qui permettent d'éclairer et de situer les forces et faiblesses inhérents à chaque technique [Castagné&Cadoz.03_#]. Les 10 critères que nous proposons couvrent la notion d'optimalité computationnelle, les qualités sonores (et plus généralement phénoménologiques) et plusieurs aspects relevant de la notion d'utilisabilité.

Nous avons accordé volontairement une place importante à cette dernière dimension, qui occupe à elle seule six des dix critères. Alors qu'elle était jusqu'alors que peu considérée, la notion d'utilisabilité nous semble en effet tout à fait essentielle pour évaluer la possibilité d'utiliser la technique dans un processus de création par un musicien.

Chaque technique a ensuite été positionnée suivant chacun des critères. Cette analyse et cette grille de critères ont été publiés sous divers angles dans les communautés de l'Informatique Musicale et de l'Acoustique [Castagné&Cadoz.03_#] [Castagné&Cadoz.04c_#]¹³.

Au moyen de notre analyse comparée et de notre grille de critères, nous pensons avoir contribué à mettre en évidence les intérêts essentiels des réseaux physiques constructivistes pour la création musicale. Ces raisons sont résumées ci dessous en conclusion de ces études :

- *Modularité et processus constructiviste* : le formalisme des réseaux physiques est un système extrêmement modulaire, avec lequel le processus de modélisation naturel est « bas-haut », fondé sur l'assemblage de modules élémentaires en un réseau, avec tous les intérêts connus de cette démarche, par opposition à des démarche « haut bas » basées sur la discrétisation de formulations mathématiques continues intégrées.
- *Minimalité* : chaque module est un modèle d'un comportement élémentaire donné. Chaque module est pragmatiquement maîtrisable ; sa fonction physique est compréhensible ; il est facilement expérimentable.
- *Utilisabilité* : Avec ses propriétés de modularité et de minimalité, le formalisme présente une « utilisabilité » aujourd'hui prouvée. Il est possible de *l'enseigner* et de *l'apprendre*, ce jusqu'à un très haut niveau de compétence en modélisation physique. De façon corolaire, il se prête naturellement bien à la conception d'environnements de modélisation.
- *Caractère générique* : il s'applique de façon générique à toutes les situations relatives à la modélisation et la simulation de phénomènes dynamiques (ou « mécaniques »), en particulier, mais pas seulement, ceux destinés à la sensori-motricité humaine, quelle que soit l'échelle de ses phénomènes, leur nature ou leur complexité. Un seul formalisme (et donc un seul type de savoir-faire) est ainsi utilisé pour la simulation d'une très large diversité de comportements, éventuellement au sein d'un unique modèle constitué de parties en interaction.
- *Multisensorialité* : dans la continuité de la propriété de généricité, le formalisme s'applique quelle que soit la modalité sensori-motrice convoquée : vision, audition ou interaction gestuelle au moyen d'un système haptique. Il s'inscrit donc transversalement dans les domaines de l'informatique graphique, de l'informatique musicale, de l'haptique et des réalités virtuelles. Il permet de ce fait d'envisager leur coopération, donc d'aller vers l'interaction *multisensorielle*.
- *Calculabilité et garantie de la cohérence physique* : contrairement à d'autres approches, par exemple fondées sur la résolution d'équations non linéaires, la formulation réseau

¹³ Ces analyses, initialement produites dans le contexte de l'informatique musicale, ont été par la suite proposées et généralisées à d'autres domaines scientifiques et artistiques [Castagné.07e_#] [Castagné.07d_#].

assure que tout réseau bien formé, même ceux qui modélisent des comportements non-linéaires, est calculable et satisfait dès le plus bas niveau les principes essentiels de la physique Newtonienne. Ces principes sont garantis par le formalisme et non pas à la charge du modélisateur.

- *Optimalité* : le formalisme, pensé pour l'interaction temps réel, tient compte de la nécessité de l'optimalité des calculs. Outre que l'algorithme de chaque module offre une formulation optimale du principe physique élémentaire qu'il représente, sa formulation axiomatique permet que chaque implantation peut être optimisée pour l'architecture cible, par exemple en termes de structures de données et de séquençement des calculs.

2.2 L'environnement GENESIS

Responsable	C Cadoz
Chercheurs impliqués	C. Cadoz, N Castagné
Temporalité de mon implication	: depuis 1998.
Contexte de mes travaux	: Doctorat, puis Ingénieur de Recherche, puis Maître de Conférences. Projet interne au groupe, dirigé par C Cadoz.
Publications :	[Castagné.02-thèse_#] [Castagné&Cadoz.02a_#] [Castagné&Cadoz.02b_#] [Castagné&Cadoz.04b_#] [Castagné&Cadoz.02c_#] [Castagné et al.09_#] [Castagné&Cadoz.09_#] [Castagné&Cadoz.04d_#]
Co-encadrements :	Co-direction de la thèse de J Leonard (en cours) 9 stages dont 4 PFE ingénieur & 3 M2. Ingénieurs et techniciens.

L'objectif du projet GENESIS était de proposer aux musiciens et compositeurs un environnement logiciel permettant de développer une activité de création musicale complète, incluant la création du modèle comprise, fondée sur la modélisation physique avec le formalisme masses-interactions CORDIS-ANIMA [Cadoz et al.90a] [Luciani et al.91] [Cadoz et al.93]. Ce faisant, nous cherchions également à confronter ces principes à l'expérimentation musicale.

GENESIS est aujourd'hui disséminé au moyen de divers canaux, y compris celui d'une diffusion commerciale, tant dans la communauté scientifique que dans la communauté musicale. Après plus de 15 ans d'histoire, on compte environ 50 œuvres réalisées avec le logiciel, plusieurs dizaines de milliers de modèles, et en moyenne deux à quatre ateliers internationaux¹⁴ par an qui réunissent artistes-compositeurs et/ou scientifiques, professionnels et/ou étudiants.

Nos travaux sur GENESIS ont débuté en 1998, en s'appuyant sur les expériences antérieures menées au laboratoire, dont notamment un prototype issu d'un stage de Master 2 en 1996 [Corbun&Cadoz.95]. Ils donnent encore lieu à des développements importants.

Nos recherches se sont alors déroulées selon trois lignes de progression :

- La conduite d'une réflexion sur les voies par lesquelles le créateur mettant en œuvre les modèles physiques avec GENESIS est amené à modifier son approche de création musicale et la caractérisation des processus nouveaux qu'il doit aborder. Ceci a nécessité une analyse des tâches s'accomplissant lors de la création avec CORDIS-ANIMA et GENESIS.
- La conception et l'implantation proprement dite des versions successives du logiciel GENESIS au moyen d'un processus incrémental s'étalant sur maintenant plus de 15 ans. Ce processus a été mené en parallèle avec de nombreuses expérimentations musicales par des collègues, des étudiants et des compositeurs, expérimentations et évolutions du logiciel se nourrissant mutuellement. Cela a nécessité l'invention de fondations logicielles et de principes ergonomiques nouveaux et adéquats, robustes et adaptés à la nouveauté et la diversité des processus d'usage en jeu.
- La caractérisation précise et le positionnement de ces principes logiciels en tant que fondateurs d'un nouveau type de paradigme d'environnement logiciel pour la création numérique.

¹⁴ <http://acroe.imag.fr/proj/aicreativity/node/54> ; <http://acroe.imag.fr/proj/aicreativity/node/19>
Accédés décembre 2013.

2.2.1. L'invention et le positionnement d'un nouveau type d'environnement de création

Un premier résultat de ces travaux tient dans le logiciel lui-même : l'environnement GENESIS, progiciel pour la création musicale avec les modèles physiques masses interactions CORDIS-ANIMA – version 0.1 1995 [Corbun&Cadoz.95] ; version 1, 1997-2005 [Castagné.02-Thèse, partie IV, V, VI, VII_#], [Castagné&Cadoz.02a_#] [Castagné&Cadoz.02b_#] [Castagné&Cadoz.04b_#] ; version 3 2007-2012 et suivantes, plus de 200000 lignes de code, C++ [Castagné&Cadoz.09_#]¹⁵.

La conception d'un environnement tel que GENESIS n'adresse pas seulement l'implémentation d'un certain nombre de briques logicielles bien conçues et utilisables sur le long terme. Un défi essentiel à relever dans l'élaboration de GENESIS vient précisément de la nouveauté des concepts et des processus qu'il s'agissait de réifier. Nos résultats tiennent ainsi également dans l'identification, la caractérisation et la justification d'une nouvelle catégorie de logiciels. Cette nouvelle catégorie est définie par l'ensemble de fonctionnalités et par les ergonomies innovantes qui en sont la signature, mais aussi par les processus nouveaux de son utilisation.

Nous avons positionné ce paradigme logiciel dans la littérature, dans l'histoire des technologies de création musicale, ainsi qu'en vis-à-vis de grandes catégories de logiciels tels que ceux portés par les traitements de texte WYSIWYG, les tableurs, ou, plus proche de notre domaine d'application, les logiciels de montage sonore, les séquenceurs, les « *patcheurs* » de blocs de traitement du signal sonore, les modeleurs 3D, etc.

Dans les paragraphes qui suivent se trouvent résumées les grandes lignes de notre positionnement et les principes, fonctionnalités et ergonomies que nous avons déterminés pour l'environnement GENESIS. Le lecteur en trouvera l'étude détaillée dans [Castagné.02-Thèse_#] [Castagné&Cadoz.02a_#] [Castagné&Cadoz.04b_#] puis [Castagné et al.09] [Castagné&Cadoz.09].

Une interface pour médiatiser le principe des réseaux masses-interactions : un processus de construction modulaire

L'objectif premier est que l'utilisateur dispose d'une complète maîtrise du processus de modélisation physique et donc de création. Il s'est donc agit de concevoir une interface permettant de s'appropriier les concepts et non de les masquer, une interface qui rende ceux-ci *accessibles* et non pas *invisibles*, contrairement à ce que propose la plupart des systèmes de modélisation/simulation physique en informatique musicale.

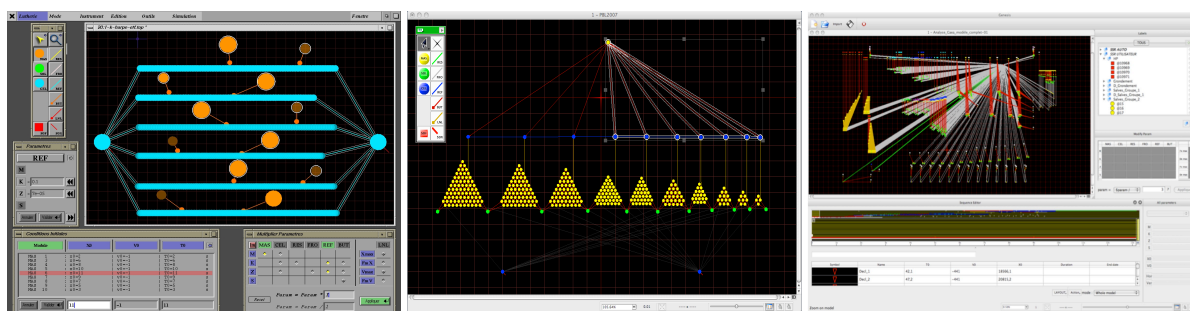


Figure 6 : aperçus de l'interface de GENESIS 1 – 1996-2009, et de la nouvelle version GENESIS³ – 2009 et suivantes.

GENESIS se présente à l'utilisateur comme un "tableau noir" sur lequel le musicien vient formellement écrire point à point son modèle par assemblage de modules physiques élémentaires.

¹⁵ Présentation succincte « grand public » disponible sur <http://acroe.imag.fr/proj/aicreativity/node/24>.

Ainsi, GENESIS est une interface pour *pratiquer CORDIS-ANIMA*. Cette interface, qui donc médiatise le formalisme des réseaux masses-interactions CORDIS-ANIMA, facilite la construction de réseaux physiques et l'expérimentation avec ces réseaux. Mais elle ne propose pas de solution toute faite à l'utilisateur. On ne trouvera pas, par exemple, de macro-blocs plus ou moins opaques supposés modéliser telle ou telle famille d'instruments ou de mécanismes producteur de sons

GENESIS ne cherche pas à cacher la complexité inhérente à l'activité de modélisation et veut rester neutre vis-à-vis de cette activité et vis-à-vis des modèles auxquels elle aboutit. Il est un outil qui accompagne l'utilisateur dans son processus de création, y compris donc dans l'assemblage des masses et des interactions selon son inspiration, dans ses expérimentations et dans son apprentissage, dans sa compréhension et sa maîtrise progressives de l'activité complexe qu'est la modélisation, en particulier la modélisation physique, ceci pouvant aller jusqu'à un très haut niveau d'expertise.

De façon corollaire, dans GENESIS, l'utilisateur est invité à construire point-à-point son réseau masses-interactions à partir de blocs élémentaires simples (des « masses » <MAT> et des « interactions physiques » <LIA> entre masses). Des fonctionnalités évoluées sont certes disponibles pour, par exemple, générer des parties de réseau à topologie régulière. Néanmoins, il ne s'agit là que de raccourcis pour un assemblage qu'il serait parfois fastidieux de réaliser par des manipulations point-à-point. L'utilisateur dispose à tout moment de la possibilité de modifier, au niveau de détail qu'il souhaite, la topologie du réseau ainsi généré. Le processus de modélisation est donc, par principe et par construction, éminemment modulaire et ce jeu de construction peut être poussé jusqu'aux plus fins détails de réseaux très complexes.

Modularité dans GENESIS : faible nombre de types de modules, grand nombre d'instances

Le faible nombre des types de modules et la possibilité d'un grand nombre d'instance de ces modules sont caractéristiques de la notion de modularité dans l'environnement GENESIS.

Le nombre des briques élémentaires que nous avons choisies et rendues accessibles à l'utilisateur est très faible, puisqu'il n'excède pas 10. Pour les éléments matériels : points fixes (SOL), masses mobiles (MAS), oscillateur physique élémentaire (cellule CEL) ; pour les éléments de liaisons : élasticité linéaire (RES), viscosité linéaire (FRO), liaison visco-élastique ou ressort-frottement (REF), liaison « butée » (BUT) modélisant une visco-élasticité conditionnée à la distance des deux masses connectées, liaison non linéaire généralisée (LNL). S'y ajoutent deux types de modules de Sortie sonore recueillant respectivement une information de position (X) ou de force (F) (SOX et SOF). Tous les modèles sont construits en assemblant, paramétrant et initialisant des modules choisis exclusivement parmi ces 10 types de modules.

A l'inverse, GENESIS a la capacité de supporter un très grand nombre d'instances de ces types de modules. Le nombre de modules que peut réunir un modèle est virtuellement illimité. Il n'est plus rare qu'un modèle comporte plusieurs milliers ou dizaines de milliers de modules - le maximum atteint à ce jour étant de l'ordre de 550 000 modules, dans des expérimentations sur des environnements de propagation résonnants de très grande taille.

Des modèles unidimensionnels ; des échelles très larges dans les phénomènes générés.

Les modèles physiques assemblés dans GENESIS sont *unidimensionnels*, en ce sens que toutes les variables physiques (positions, vitesses, forces...) sont calculées suivant un unique « axe des mouvements ».

Ce choix, apparemment restrictif, est en fait pertinent pour les applications sonores et musicales. Tout d'abord, nombre des phénomènes dynamiques oscillants sonores sont analysables suivant

une dimension unique, au moins en première approximation, de sorte que les modèles unidimensionnels permettent de modéliser une très large diversité de corps sonore¹⁶ : cordes, tubes vibrants, membranes, etc. Incidemment, dans une étude que nous avons conduite en 1997 sur le potentiel des modèles multidimensionnels pour le son, étude à laquelle il sera fait référence dans ce document à la section 5.1, nous avons montré que, si ce potentiel est réel, il peut être en revanche approché au moyen de modèles unidimensionnels par l'introduction de certains types de non-linéarités.

Par ailleurs, l'unicité de l'axe des mouvements facilite considérablement le processus de modélisation en ce qu'elle libère l'utilisateur des problèmes complexes inhérents à la maîtrise de l'espace. En outre, sans la spatialité, il devient nettement plus aisé d'articuler entre eux des modèles de très grande taille. Ainsi, d'une certaine manière, on peut dire qu'il n'y a pas de spatialité dans les modèles GENESIS. Cette propriété, bien sur, ne s'oppose pas à la possibilité de travailler, via l'architecture des modèles, les indices spatiaux dans les sons générés : effets de salle, etc.

En revanche, GENESIS n'impose aucune limitation quant aux échelles des paramètres des modèles réalisés et des phénomènes qu'ils génèrent. Les modèles peuvent, en particulier, être constitués de parties évoluant à des échelles spatiales de vibration très différentes (*e.g.* dans un facteur d'échelle supérieur à 10^{10}) ainsi que de parties présentant des propriétés fréquentielles très variables (parties « sonores » dont les fréquences propres sont dans la bande audible, *e.g.* 20 - 20000 Hz ; modèles « gestuels » dont les fréquences propres sont celles du geste humain, *e.g.* 0 à 100 Hz, etc.). Avec cette importante propriété, il devient possible d'articuler dans un même modèle des parties « génératrices de sons » avec d'autres parties « génératrices d'événements sonores ». Nous reviendrons plus loin sur l'intérêt profond de cette possibilité en matière compositionnelle.

Simulation non synchrone

Dans GENESIS, les calculs de simulation sont réalisés en temps non synchrone, parfois appelé « temps différé »¹⁷, sans interaction, par exemple gestuelle, entre l'utilisateur et le calcul.

Le fait qu'il n'y ait pas d'interaction gestuelle possible peut sembler contraire aux principes de la notion d'interaction instrumentale, revendiqués par le groupe et exposés dans ce mémoire. Il peut aussi sembler anachronique, dans la mesure où il ne souscrit pas à l'intérêt fort, que l'on a pu constater en informatique musicale depuis les années 1995, pour les recherches sur l'interactivité temps réel, autour par exemple de la notion de « *mapping* », dans des environnements logiciels tels que *PureData*, *Max/MSP* ou *SuperCollider*.

L'une des raisons de ce choix, peut être la principale, tient au fait que pour tester, dans toute leur ampleur, les principes de la modélisation physique pour la création musicale, il était essentiel de permettre des structures techniquement et musicalement très complexes. Il fallait pour ce faire s'affranchir des limitations, par exemple en matière de taille du réseau, qu'auraient introduites l'interactivité et/ou le synchronisme. Il était en quelque sorte urgent de démontrer, libéré provisoirement de toute contingence d'implémentation spécifique, le degré de « musicalité » du concept CORDIS-ANIMA – comme celui d'utilisabilité, au sens où nous l'avons défini ci-dessus. Ainsi, a pu être développé, par Claude Cadoz, la notion de composition musicale avec les modèles physiques, à un niveau très fondamental pour la recherche et la création musicale.

En corollaire, ce découplage provisoire entre développement du logiciel de modélisation et dispositifs d'interaction gestuelle a permis que, de leur côté, les questions relatives au jeu

¹⁶

¹⁷ Ce terme de « temps différé » n'est plus correct, car, compte tenu de la puissance de calcul des ordinateurs, il advient la plupart du temps, que l'utilisateur n'ait pas à attendre – à différer – l'écoute de son résultat. GENESIS calcule ainsi la plupart des modèles en temps réel, voire plus vite que le temps réel.

instrumental « temps réel » et à l'interaction gestuelle instrumentale ou aux transducteurs haptiques, questions par ailleurs essentielles dans les travaux du groupe ACROE-ICA, puissent progresser et être étudiées de façon indépendante des questions relatives aux environnements de modélisation et à l'activité de modélisation.

Depuis 2011, les deux axes, forts de leur maturité respective, sont en cours de jonction au sein du groupe. Nous reviendrons sur ces travaux nouveaux dans la suite de ce document.

De l'usage du canal visuel

Bien qu'étant dédié à la création sonore et musicale, l'environnement GENESIS fait largement appel au canal visuel dans l'activité de création. En particulier, le principe des réseaux physiques rend possible une représentation graphique systématique des modèles en cours d'assemblage mais surtout en cours de simulation (figure 7). La visualisation graphique de la simulation constitue une propriété certainement très originale dans les environnements de création musicale, mais aussi et surtout très utile.

Bien plus qu'un simple agrément, cette représentation graphique est en effet une aide précieuse pour l'activité de modélisation. Par la représentation géométrique et spatiale d'une topologie et de ses déformations, par le réglage de l'angle de vue, la maîtrise de la vitesse de la projection visuelle, ou le choix parmi plusieurs options de visualisation, la représentation graphique permet à l'utilisateur d'associer les déformations de son réseau aux sons qu'il produit et d'observer finement les phénomènes dont son modèle est le siège. Il peut ainsi mieux les appréhender puis, le cas échéant, modifier le modèle en conséquence.

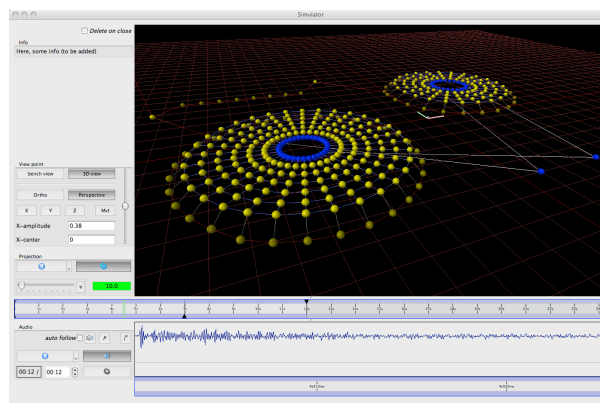


Figure 7 : représentation graphique d'un modèle en cours de simulation dans GENESIS (modèle par C Cadoz).

Ces propriétés caractéristiques structurent l'architecture logicielle du système. Mais le paradigme logiciel de GENESIS est également caractérisé par un certain nombre de propriétés ergonomiques de l'interface elle-même.

Etabli topologique interactif

Le travail avec GENESIS s'organise autour d'un « établi topologique », parfois appelé « tableau noir », qui offre une représentation fonctionnelle bidimensionnelle du réseau de modules. C'est sur cet établi que l'utilisateur positionne et assemble point-à-point le modèle, suivant les principes de la manipulation directe proposée dans la discipline des IHM¹⁸. L'établi accueille en outre un système d'annotations textuelles libres. On trouvera dans [Castagné.02-These_#] une description des choix réalisés en matière de représentation graphique fonctionnelle des modules, de leur connexions, et du réseau final qu'ils constituent.

¹⁸ Interfaces (ou Interactions) Homme-Machine, discipline renommée récemment Interfaces (ou Interactions) Personne-Système.

Notons qu'une propriété importante et originale de l'établi est que *le positionnement des modules dans le plan de représentation n'a aucun impact sur le calcul de simulation*, donc sur les sons résultants. En effet, les modèles physiques GENESIS étant unidimensionnels, tous les calculs physiques sont réalisés en ne considérant qu'un axe unique, « l'axe des mouvements », perpendiculaire à l'établi. L'état des <MAT> ne s'exprime que suivant cet axe des mouvements, et dans le calcul des forces au sein des modules <LIA>, seule compte les positions et vitesses des <MAT> sur cet axe.

Ainsi, à titre d'exemple, le réseau va pouvoir comporter plusieurs sous ensembles (couplés évidemment par des interactions) dont les positions respectives sur l'établi ne seront pas significatives dans les sons générés. L'utilisateur peut ainsi échapper, s'il le désire, à toute représentation figurative de « l'objet » modélisé (pour autant qu'il ait un correspondant réel).

Par ailleurs, l'existence de l'établi offre plusieurs intérêts suivant le degré de profondeur dans l'activité de modélisation.

Dans un premier temps, l'établi va faciliter l'approche du système par un utilisateur néophyte, en lui donnant l'impression, conformément aux principes de la manipulation directe en IHM, que la représentation *est* le modèle en cours de conception voire qu'elle *est* l'hypothétique objet modélisé (la corde, la plaque, etc.) – ce qui est faux bien entendu. Nous avons maintes fois constaté que ce raccourci initial rend la prise en main du logiciel plus aisée et plus agréable.

Mais cette première impression s'estompe rapidement au profit d'une distanciation entre la représentation graphique et le modèle. Cette distanciation s'installe naturellement, ne serait-ce que lorsque l'utilisateur constate que le plan de l'établi est un artefact de représentation, la position des modules sur l'établi n'influant en rien sur la simulation.

Dès lors, l'établi acquiert un rôle nouveau. Il devient tout d'abord le lieu sur lequel l'utilisateur constate et modifie la topologie du réseau de modules : types de modules en jeu, et nature de la topologie du réseau formé par les interactions physiques (linéique, surfacique, maillage carré, etc.). Il devient ensuite le moyen premier permettant, dans GENESIS, de naviguer dans les diverses parties du modèle et de sélectionner des modules pour leur appliquer des traitements de modélisation divers (*e.g.* affecter des valeurs aux paramètres physiques, globalement, ou module par module).

Enfin, l'utilisateur se saisit progressivement de la latitude offerte par le placement des modules dans le plan de l'établi pour représenter toutes sortes de propriétés au gré de ses besoins.

On a ainsi pu constater de nombreux usages de la liberté de placement sur l'établi, tels que : mettre en évidence des parties significatives, séparer spatialement diverses parties du modèle, en faire ressortir les diverses fonctions, imiter la forme de l'objet modélisé, placer certains modules de telle sorte que leur sélection à la souris soit facilitée, utiliser l'axe horizontal de l'établi comme un « axe temporel » suivant lequel certaines parties de modèles sont placées en fonction de l'instant auquel elles interviendront dans la simulation, utiliser l'axe vertical comme une échelle de tonie, etc. Par ailleurs, remarquons que l'utilisateur peut avoir recours à plusieurs de ces usages de l'établi pour diverses parties d'un modèle complexe. Plus généralement donc, le placement sur l'établi devient un vis-à-vis permettant à l'utilisateur d'accompagner librement divers aspects de son processus de modélisation et de composition.

Plus fondamentalement, passées les premières étapes de la prise en main du logiciel, les principes de l'établi de conception topologique et le fait d'échapper à la représentation figurative d'un « objet » poussent progressivement l'utilisateur vers une sorte d'abstraction conceptuelle. Elle l'accompagnent vers la prise de conscience de ce que la modélisation physique est, par nature, une activité éminemment conceptuelle. Elle l'aide, en outre, à échapper au piège du réalisme, que nous avons identifié dans les paragraphes précédents comme pouvant imposer une limite à la modélisation physique.

Ergonomie des outils d'édition

Les versions successives de GENESIS ont permis d'affiner un ensemble de dispositions ergonomiques pour l'édition des propriétés du réseau, comme, par exemple, les ergonomies des espaces d'édition des paramètres physiques permettant un ajustage précis des paramètres, aussi bien « en groupe » (*e.g.* dans des zones homogènes ou en appliquant des lois de modification à des groupes de paramètres) que par module, ou les ergonomies dédiées à l'édition des conditions initiales. Ce seront également des outils évolués pour la manipulation de la topologie du réseau avec la souris ou par commandes textuelles.

Outils et ergonomies pour aider à appréhender la complexité des réseaux

Enfin, GENESIS propose un ensemble de fonctionnalités destinées à soutenir l'utilisateur dans la construction et la manipulation de réseaux physiques complexes et/ou de grande taille.

L'établi topologique « à placement libre » en est un exemple. Les fonctionnalités de gestion du point de vue sur l'établi confèrent par ailleurs à GENESIS certaines qualités des Interfaces Zoomable (ZUIs) : outils de navigation rapide, adaptation de la représentation graphique et de l'affichage des annotations textuelles à la complexité de la partie du modèle visible, etc. L'outil de sélection par « ensembles libres » (GENESIS 1), étendu dans la dernière version de GENESIS à la notion de « labels » (en héritage de MIMESIS) est une autre proposition originale permettant d'organiser la complexité des réseaux physiques pour permettre sa maîtrise par l'utilisateur. Nous revenons sur la notion de « label » dans la section 4.5.

2.2.2. Un environnement pour « penser l'instrument » ; la modélisation physique comme un principe fondamental pour « penser la musique »

On aura donc pu constater progressivement que l'approche de la création musicale proposée par GENESIS se distingue de celles des autres outils de modélisation physiques disponibles.

Tout d'abord, contrairement à la plupart des autres approches du modèle physique à l'usage du musicien, GENESIS ne propose pas des primitives toute faites de tout ou partie d'instruments réels qui ont pour inconvénient de réduire la modélisation à une activité de paramétrage ou, plus limité encore, de juxtaposition. Ainsi GENESIS rend-il le musicien intégralement maître de l'activité abstraite de construction de son modèle, jusque dans ses plus fins détails. Et surtout il va pouvoir créer un modèle qui n'appelle nécessairement la réalité. Il s'agit pour nous d'exigence premières de la création musicale.

Les usages encore récents, mais maintenant nombreux, de GENESIS par des musiciens démontrent en effet qu'un compositeur, bien qu'il puisse ne pas être un scientifique, est à même de s'appuyer sur une certaine compréhension des mécanismes physiques en jeu dans la genèse d'un son par un corps physique (tel qu'un instrument par exemple), pour conduire seul un processus de modélisation physique complexe.

Avec GENESIS, les modules élémentaires et les règles d'assemblage valent pour une nouvelle forme d'écriture musicale [Cadoz.11]. La modélisation physique devient alors un paradigme pour la musique, un langage « musical ». Cette vision s'oppose à ce qui est pratiqué en Informatique Musicale et en synthèse de sons par modèles physiques, où c'est un scientifique qui conçoit le modèle puis le rend – parfois ! – disponible.

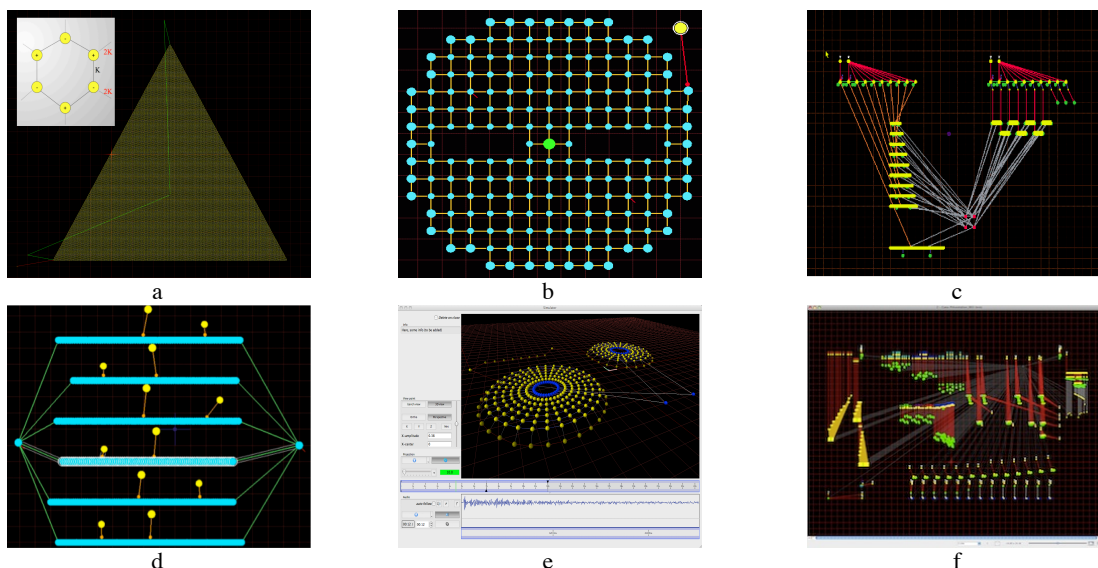


Figure 8 : Quelques exemples de modèles GENESIS sur l'établi. A ce jour, on estime que plus de 100000 modèles GENESIS ont été réalisés par les divers utilisateurs [Cadoz et al.11_#].

- a) membrane composée de 39997 MAS à topologie régulière hexagonale – étude de modèles de résonateurs sonores pour effets audio spatiaux, C Verner, 2012.
 - b) modèle de cloche non homogène, tutoriaux GENESIS.
 - c) partie d'un modèle de la pièce musicale Gaea, Claude Cadoz, 2007.
 - d) modèle multi-corde percutees, tutoriaux GENESIS.
 - e) vue 3D d'un modèle en cours de simulation. C Cadoz.
 - f) une vue du modèle complet de la pièce musicale Gaea, Claude Cadoz, 2007.
- Le modèle complet comporte plus de 30000 modules.

Mais GENESIS permet, avec le même principe des réseaux physiques masses-interactions, d'envisager la création musicale bien au delà de la simple représentation de corps sonores existants dans le monde mécano-acoustique ou imaginaires et bien au delà de la synthèse de son.

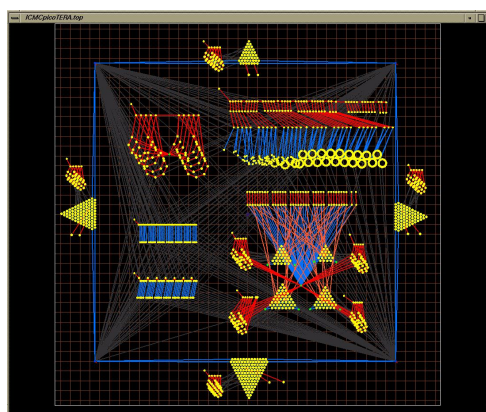


Figure 9 : le modèle de la pièce (musicale et physique) « pico..TERA » de Claude Cadoz. [Cadoz.02a]

Nos travaux sur le logiciel GENESIS et les recherches et les créations avec le logiciel, en particulier sous la conduite de C. Cadoz, prouvent que le potentiel de la modélisation physique, lorsque celle-ci est envisagée dans le contexte de la création musicale, dépasse le cadre de la synthèse de son où il était jusqu'ici cantonné, pour adresser l'ensemble de la création musicale.

GENESIS offre ainsi au musicien la possibilité de "physicaliser" ses idées musicales et non seulement sonores ou instrumentales. Il est ainsi le ferment technologique d'un nouveau processus de création, la « composition de (ou avec les) modèles physiques » [Cadoz.02a].

L'œuvre *pico..Tera* de Claude Cadoz (Figure 9) est la première des œuvres issue de la mise en œuvre de ce processus de création nouveau. Cette pièce de sons fixés (« pièce » étant entendu ici au sens d'œuvre musicale) résulte de la simulation d'un modèle *unique* constitué de plusieurs dizaines de milliers de modules. Ainsi, la « pièce » (« pièce » étant cette fois entendu sous le sens d'un espace physique dans lequel figure des objets) comprend de nombreux objets haute et

basse fréquence en interaction. Les premiers sont responsables de la synthèse des sons et les seconds de l'exécution ou du développement macro-temporel de l'œuvre. Dans ce processus, l'ensemble de l'œuvre musicale tient en un unique macro-modèle, dans lequel cohabitent, collaborent et interagissent des structures haute fréquence, générateurs de son, et des structures physiques génératrices des sons, et des structures physiques génératrices d'évolutions lentes, réalisées comme des métaphores du geste instrumental.

Dans un tel processus, qui nécessite un très grand nombre de modules, on est bien sûr très éloigné d'une application temps réel instrumentale telle qu'envisagée au début de ce document. On pourrait même dire qu'on en est diamétralement opposé : le principe de la « composition de (ou avec les) modèles physiques » [Cadoz.02a] [Cadoz et al.11_#] permet à l'utilisateur de GENESIS d'aborder avec la modélisation physique des problématiques relevant de la composition musicale.

Les expériences sont encore récentes et se poursuivront. Outre les expérimentations en situation de création d'œuvres musicales par plusieurs compositeurs, la thèse de Giuseppe Gavazza, dirigée par Claude Cadoz, a récemment débuté sur ce thème. On peut d'ores et déjà observer deux bénéfices fondamentaux :

- D'une part, ce processus offre un gain significatif dans la qualité des phénomènes produits par rapport à une situation où une « partition » écrite, constituée par une série d'événements sonores prescrits, serait ensuite « jouée », par exemple au moyen d'un quelconque synthétiseur. Les modèles physiques s'avèrent en effet également adaptés à la génération de formes gestuelles, et l'interaction des modèles sonores et gestuels permet une rétroaction perceptible et pertinente des uns sur les autres. Forme musicale et pâte sonore émergent ensemble d'un seul et même macro-modèle.
- D'autre part, comme l'a écrit A Luciani, en particulier lors de son organisation des symposium de la conférence #AST 2011¹⁹, ce processus démontre que les modèles physiques apportent, de façon originale, une solution à une opposition séculaire et jusqu'à aujourd'hui indépassable pour la musique : celle du matériau (le son) et celle de la structure (la composition). On peut ainsi espérer dans ce contexte une extension des paradigmes pour la création musicale et une réduction de la « coupure ontologique » matériau /composition, historiquement forte en musique.

GENESIS est à notre connaissance encore à ce jour le seul environnement qui non seulement donne accès à la réalisation de modèles physiques capables d'engendrer des sons de synthèse particulièrement pertinents dans leur qualités, mais qui, bien plus fondamentalement, propose la modélisation physique comme un moyen fondamental pour la création musicale et l'envisage comme une véritable activité « de création ».

Pour clore ce chapitre, en nous situant dans la perspective de la jonction future des recherches sur GENESIS et des travaux du groupe relatifs aux technologies de l'instrumentalité numérique, on peut imaginer une complémentarité fine et prometteuse entre jeu instrumental « réel » sur un instrument simulé, contrôle en temps réel d'une structure simulant un jeu instrumental et « pièces de sons fixés » précomposées dans le cadre de GENESIS au moyen du processus de « composition de (ou avec les) modèles physiques ». On est ici renvoyés aux recherches de Claude Cadoz sur le concept de geste « supra-instrumental » [Cadoz.11] ainsi qu'aux travaux s'organisant actuellement autour de la thèse de James Leonard (section 6.2).

¹⁹ Colloque #AST 2011 : Symposium « Instrumentalité et Ecriture : une nouvelle alliance »

3 Contributions à l'environnement logiciel MIMESIS pour la création du mouvement et de l'image animée

Depuis 2003, j'ai intégré progressivement l'équipe « technologies pour les arts visuels » du groupe, dirigée par Annie Luciani, sur des travaux dans le domaine de l'informatique graphique relatifs à l'environnement MIMESIS pour la création de mouvements et d'images animées.

3.1 Positionnement : modélisation et simulation physique et image animée, vers un « art du mouvement visuel »

Les travaux de positionnement des propositions du groupe dans le domaine de l'informatique graphique et en matière d'outil pour la création visuelle sont emmenés par A. Luciani [Luciani.09] [Luciani.11]. Je n'y ai pas participé directement jusqu'à récemment, étant engagé plutôt dans le domaine de l'informatique musicale. J'ai eu depuis l'occasion d'être confronté aux grandes orientations de la discipline, en particulier lors ma récente participation à la conférence SIGGRAPH'2012, missionné par l'AFIG (association Française d'Informatique Graphique)²⁰. C'est pourquoi j'en dirais quelques mots ici, afin de situer mon activité dans son contexte.

Une analyse des publications traitant de simulation physique en informatique graphique permet de mettre en évidence plusieurs positionnements traditionnels, théoriques et méthodologiques, généralement adoptés, explicitement ou de manière sous-entendue, par la communauté de l'image de synthèse :

1/ Les algorithmes physiques y sont envisagés comme des moyens de mettre en mouvement des formes modélisées préalablement. Autrement dit, la *forme* est première ; le *mouvement*, la dynamique, viennent en second, comme une extension. Incidemment, ce positionnement est conforme à l'histoire du domaine.

2/ Les algorithmes physiques traitant du mouvement y sont inextricablement liés aux structures modélisant la forme. En conséquence, chaque méthode de calcul physique n'est adaptée qu'à une méthode donnée de représentation de la forme, sur laquelle elle s'appuie. Symétriquement, les publications mêlent de façon étroite les considérations ayant trait à la forme (sa structuration, son évolution...) et au calcul du mouvement. Forme (géométrie) et mouvement (dynamique) sont abordés de concert.

3/ Mis à part quelques classes d'algorithmes très généraux, tels que, par exemple, les classes d'algorithmes de détection de collision ou la méthode des éléments finis, les travaux sont pour l'essentiels formulés au « cas par cas », pour résoudre un problème spécifique d'animation. Ainsi, les publications scientifiques ont le plus souvent trait à un modèle ou à un algorithme traitant un problème précis d'animation. Elles ne s'intéressant que rarement à la conception de techniques génériques et de systèmes logiciels flexibles (modeleurs, etc.).

4/ Les travaux sont le plus souvent étroitement liés à des perspectives d'applications industrielles, en particulier pour le cinéma d'animation 3D et le jeu vidéo.

²⁰ Mission effectuée à la conférence SIGGRAPH 2012 pour le compte de l'Association Française d'Informatique Graphique (AFIG) et du Groupement de Recherche *Informatique Graphique* du CNRS, dans le cadre de leur « mission SIGGRAPH » annuelle –<http://www.asso-afig.fr/actualite-2-appel-a-mission-siggraph-2012.html>. J'ai proposé un compte rendu lors des « journées AFIG 2012 », Calais, novembre 2012 et publié durant la conférence des billets en ligne <http://afig.siggraph2012.overblog.com/> [Castagné.12].

Les points 3/ et 4/ ont pour corollaire que la perspective de la création artistique (par exemple le contexte des « *fine arts* ») est rarement motrice des recherches entreprises. Incidemment, il est remarquable que cette situation soit tout à fait différente de ce que l'on peut observer dans le domaine de l'informatique musicale.

A l'opposé, Luciani explique, par exemple dans [Luciani.09], en quoi les travaux en informatique graphique menés au sein du groupe se distinguent en plusieurs points importants des positionnements usuels que nous venons de décrire.

Tout d'abord, les travaux du groupe ont pour objectif général de permettre à un artiste de se saisir de la question du mouvement dans l'image, avec, en perspective, l'idée d'un « *art du mouvement visuel* » :

« (...) un véritable art du mouvement visuel serait encore à fonder, malgré des prémisses séculaires, et (...) les technologies actuelles en seraient une occasion exceptionnelle.
Un art du mouvement est un art dans lequel le mouvement lui-même serait l'objet artistique. »
[Luciani.09] « *forme, image, mouvement : vers un art du mouvement visuel* ».

Il s'agit alors d'identifier les technologies et savoir-faire qui permettent de considérer et modéliser *pour lui-même* le mouvement adressé à l'œil. En la matière, mieux pensons nous que tout autre technique de génération de mouvement, le formalisme des réseaux physiques masses-interactions, qu'il convient de ne pas confondre avec les systèmes « masses-ressorts » bien moins généraux et encore moins avec les « systèmes de particules », fait figure « d'algèbre »²¹ pour produire tout type de mouvement :

« (...) au-delà de l'usage habituel du modèle physique pour atteindre un plus grand degré de réalisme des images de synthèse, le paradigme de la modélisation physique masses / interactions est d'abord et avant tout un puissant formalisme pour modéliser des mouvements quelconques, réels ou imaginés, par l'artiste lui-même. »
[Luciani.09] « *forme, image, mouvement : vers un art du mouvement visuel* ».

Les modèles de très nombreuses catégories de phénomènes dynamiques visuels réalisés par l'équipe image du groupe, dont des phénomènes impliquant des changements d'état complexes, apportent, en la matière, toutes les preuves nécessaires [Luciani00] [Luciani.04a] [Heigeas.03_#] : corps solides, corps déformables, écoulements de sable, pâtes, dynamiques fluides, fumées, foules, mouvements de véhicules, terrains meubles, mouvements de marionnettes, mouvements dansés, etc.

Par ailleurs, dans le contexte de l'animation en informatique graphique, tout comme en informatique musicale, le formalisme masses-interactions se distingue d'autres approches pour la modélisation et la simulation physiques par sa modularité et son utilisabilité : processus de modélisation par construction « bas-haut » du modèle, capacité à supporter l'élaboration et le partage progressif d'un savoir-faire et d'une pédagogie en modélisation [Luciani.11].

Enfin, et ceci est essentiel, A Luciani explique que le formalisme des réseaux physiques permet de considérer et modéliser les propriétés dynamiques et le mouvement visuel, en *amont* de la forme, ou encore *en s'abstrayant* de considération sur la forme : le mouvement visible « pour lui-même », donc. De façon corollaire, toutefois, le mouvement ainsi généré consiste en une série de points se mouvant dans l'espace, sans extension spatiale. Ce n'est que dans un deuxième temps que, pour permettre l'observation visuelle du mouvement généré, une forme spatiale peut lui être donnée.

²¹ Le terme est d'A Luciani : la formulation en réseau des principes newtoniens permet de considérer ceux-ci comme un formalisme algébrique ou une « mécanique algébrique », par opposition au terme « mécanique analytique » - Cf. Cours de A. Luciani, *Technologies pour les arts visuels du mouvement*, Master IC2A, spécialité Art, Science, Technologie, co-habilité par Grenoble INP / UJF / UPMF / Université Stendhal.

Ainsi, la démarche générale proposée par le groupe en matière d'informatique graphique :

- vise à fonder de nouveaux processus de création d'image animée par *synthèse du mouvement* puis *habillage* ou *mise en forme* de ce mouvement pour le rendre visible. Elle se différencie ainsi dans son principe même de la démarche usuelle de *mise en mouvement d'une forme prédéfinie* ;
- est organisée par la perspective de la création artistique, d'une part en portant un questionnement de nature artistique autour de la notion « d'art du mouvement visuel », d'autre part en visant à concrétiser la notion « d'outil de création » générique, tant au niveau des concepts que de leur réification.

Dans ce contexte, j'ai collaboré à quatre thématiques relatives à l'activité de recherche technologique pour l'image :

- La réalisation de l'environnement de modélisation/simulation MIMESIS pour la conception des modèles physiques et la création de mouvements et d'image animée.
- La question de la structuration des signaux de « geste et de mouvement », au moyen d'un nouveau format générique : le format GMS.
- La problématique du « retour à la forme » et de la « mise en image » des mouvements générés pour les « rendre visibles ».

3.2 L'environnement MIMESIS pour la synthèse de mouvement et d'images animées

Responsable	Annie Luciani
Chercheurs impliqués	A Luciani, M Evrard, A Allaoui, N Castagné
Temporalité de mon implication :	depuis 2003.
Contexte de mes travaux	Ingénieur de Recherche, puis Maître de Conférences. Projet interne au groupe, puis soutenu par le projet ANR DYNAMÉ. Sous la responsabilité d'A Luciani.
Thèses :	Participation encadrement thèse de Matthieu Evrard (2004-2009) et Ali Allaoui (2006-2010)
Autres co-encadrements :	1 post-doctorat, 5 Master pro / Ingénieur. Ingénieurs et techniciens.
Publications :	[Evrard et al.06a_#]

Dans le contexte du projet MIMESIS, initié à la fin des années 1990, j'ai été impliqué à partir de 2004, dans la finalisation de l'environnement logiciel, en particulier en participant à l'encadrement de travaux de thèse de Matthieu Evrard [Evrard.09], puis d'Ali Allaoui [Allaoui.10].

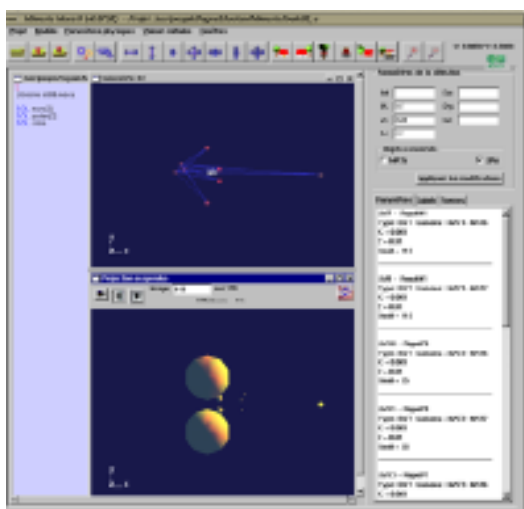


Figure 10 : vue générale de MIMESIS IV, 2006

Mon objectif dans la participation à ces travaux était double : parvenir à une maturation des concepts dont le logiciel est la représentation matérielle et assurer une qualité et une complétude suffisantes au logiciel pour permettre son expérimentation en situation de création, ainsi que sa dissémination.

L'environnement MIMESIS permet de construire de manière conviviale et interactive des modèles physiques pour l'animation de synthèse 2D et 3D et les Réalités Virtuelles.

Le mouvement s'obtient par simulation du modèle mécanique. Après avoir créé le mouvement, l'animateur habille les dynamiques obtenues en leur appliquant de manière libre des formes 2D ou 3D ou des effets visuels variés.

MIMESIS porte ainsi le positionnement original du laboratoire en informatique graphique [Evrard.09] : les images de synthèse sont produites par « synthèse du mouvement et extraction de la forme », plutôt que par « synthèse de la forme et application du mouvement ».

On adresse donc un passage qui, partant du principe, disons traditionnel, de la synthèse d'image que l'on met en mouvement, va vers celui de la synthèse du mouvement mis en image :

« MIMESIS se distingue des modeleurs dans le domaine de l'image de synthèse et de l'animation par le fait que son objet d'intérêt au sens de l'Interaction Homme-Machine est non pas la forme, mais le mouvement, ou plutôt, le modèle qui le génère.

Ainsi, la notion d'objet, prépondérante dans les modeleurs de forme, est absente à tous les niveaux de l'interface de modélisation interactive de MIMESIS. S'y substitue la notion de «réseau», dans laquelle un modèle est un réseau constitué de modules CORDIS-ANIMA interconnectés ». [Luciani.11]

Une description de la version de CORDIS-ANIMA proposée dans le logiciel et de ses principales fonctionnalités est fournie dans [Evrard et al.06a_#] : modules physiques tridimensionnels incluant une collection d'interaction physiques non-linéaires pensée pour les besoins de la modélisation du mouvement visuel, fréquence de simulation physique élevée (supérieure à 1050 Hz), langage de script pour la spécification de la topologie du réseau physique...

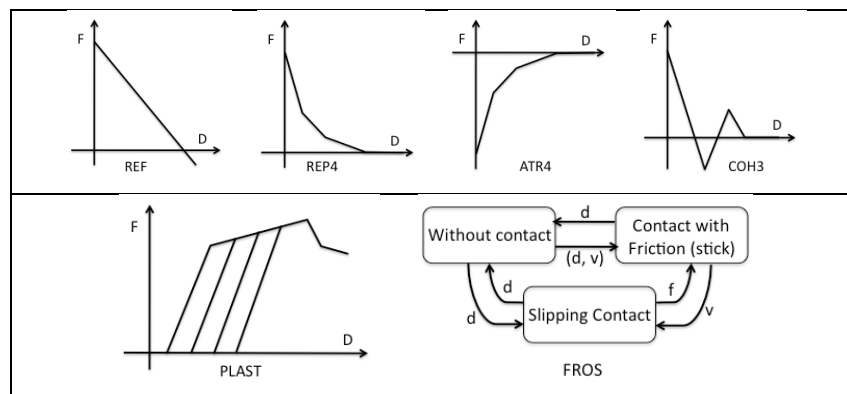


Figure 11: quelques-unes des fonctions d'interactions disponibles dans MIMESIS IV, d'après [Evrard et al.06a_#] : visco-élasticité, liaison répulsive, attractive, cohésive, plasticité avec hystérésis, frottement sec.

Incidemment, tout comme le fait GENESIS, MIMESIS IV propose des fonctionnalités et des ergonomies spécifiques à ses usages, qui en forment la signature. Nous n'insisterons pas ici sur ces aspects, dans la mesure où on peut en trouver une description dans [Evrard et al.06a_#] et où nous évoquerons plus précisément notre contribution sur ces aspects dans le chapitre suivant.

3.3 La notion de signal de geste et de mouvement et le format *Gesture And Motion Signal*

Responsable :	A Luciani
Chercheurs impliqués	Format GMS : Annie Luciani, Matthieu Evrard, Damien Couroussé, Nicolas Castagné, Claude Cadoz & Jean-Loup Florens Etudes de l'état de l'art : partenaires du projet Enactive Interfaces et chercheurs co-signataires de [Jensenius et al.07]
Temporalité de mon implication :	2005-2007
Contexte des travaux	Projet NoE européen Enactive Interfaces
Publications :	[Luciani et al.06a_#] [Luciani et al.06b_#] [Evard et al.06b_#] [Castagné et al.07e_#] [Jensenius et al.07a_#] [Jensenius et al.07b_#]
Spécifications et site Internet :	[GMS.06_#] [Evrard et al.06c_#]
Co-encadrements :	Collaboration à une partie des travaux de Thèse de Matthieu Evrard

Dans le contexte des travaux du groupe adressant la perception visuelle, un réseau physique, qui serait par exemple conçu dans l'environnement MIMESIS, est en première analyse un générateur de mouvements : son calcul produit un signal échantillonné de positions, points géométriques qui évoluent dans l'espace de simulation à la fréquence de simulation. Par ailleurs, dans le contexte des travaux s'intéressant à l'interaction instrumentale multisensorielle, la notion de « signal gestuel » apparaît quant à elle immédiatement, dès lors qu'on considère les deux signaux duaux portant la trace de l'interaction gestuelle de l'opérateur avec le périphérique gestuel : signal échantillonné de positions remontant des conversion analogique/numérique et signal de force transitant en sens inverse par les convertisseurs numériques/analogiques.

Au delà du contexte des travaux du groupe, les notions de « mouvement » et de « geste » sont transverses aux domaines des réalités virtuelles, de l'haptique et de l'informatique graphique. Ainsi, par exemple, en réalités virtuelles se pose *a minima* la question des signaux captés au niveau des nombreux périphériques de capture du geste : manettes diverses, systèmes de capture du mouvement, etc. De même, en informatique graphique, dès lors qu'on s'intéresse à la question de l'animation, il est nécessaire d'avoir recours, soit en entrée soit en sortie d'un processus, à des données numériques s'inscrivant dans le temps et portant une information dont la nature peut être qualifiée de « geste » et/ou de « mouvement ». Enfin, notons que ces notions concernent également l'informatique musicale dès lors qu'elle s'intéresse aux instruments numériques.

Dès lors, il est apparu indispensable que ces divers domaines puissent disposer de formats **communs**, adéquats pour structurer, encoder, archiver, éditer, échanger ou encore analyser ces types de données temporelles. Cette nécessité se joue d'abord au plus bas niveau, c'est à dire au plus prêt du signal lui même et indépendamment des conditions de sa capture, de sa génération ou de son utilisation. Or, comme nous l'avons démontré par le moyen d'une analyse de l'état de l'art, cette nécessité est encore insuffisamment servie. Malgré leur importance, ces types de données n'ont pas été l'objet d'une attention et d'un effort de standardisation et de normalisation suffisants pour parvenir à l'émergence et la standardisation d'une ou plusieurs grande(s) catégorie(s) de formats dédiés à leur manipulation. La question du ou des formats permettant la structuration et l'encodage à bas niveau des signaux de geste d'une part, et de mouvement d'autre part, constituait donc un *verrou* pour les domaines applicatifs concernés.

Dans ce contexte, à l'occasion du réseau d'excellence européen *Enactive Interfaces*, qui a réunit de 2004 à 2007 22 organismes européens évoluant dans les domaines des réalités virtuelles, de l'haptique, de l'informatique graphique et de l'informatique musicale, Annie Luciani a coordonné, avec mon soutien, une analyse des pratiques des partenaires et de l'état de l'art relativement à la structuration et l'encodage des signaux de geste et de mouvement [Luciani et al.06a_#]. Ce travail a ensuite été complété par une étude collaborative conduite dans le cadre

plus spécifique de l'Informatique Musicale, impliquant d'autres organismes [Jensenius et al.07a] [Jensenius et al.07b_#].

Ces études, essentiellement bibliographiques, ont confirmé que les acteurs des réalités virtuelles, de l'informatique graphique, de l'haptique et de l'informatique musicale manipulent régulièrement des « données de geste ou de mouvement », que ce soit pour les capter, les générer, les stocker, les analyser ou encore les utiliser pour divers travaux de recherche ou d'application.

Il est apparu ensuite que deux grandes catégories de « donnée de geste ou de mouvement » sont d'importance : d'une part des données bas niveau, ou brutes, que nous qualifions de *signal* de geste ou de mouvement ; d'autre part des données issues de processus de segmentation et/ou d'analyse sémantique des premières (e.g. analyse de gestes, détection de gestes de commande ou plus généralement de formes gestuelles, annotation de performances gestuelles, notation du geste dansé, etc.). Toutefois, tous les acteurs, même ceux qui de part leur centre d'intérêt scientifique ou applicatif s'intéressent plus à la sémantique du geste qu'à son expression sous forme de signal, sont à un moment ou à un autre confrontés à des signaux « bruts ».

En matière de structuration et d'encodage du *signal* de geste ou de mouvement, il s'est confirmé que, contrairement aux autres grandes catégories de données d'usage courant dans les domaines concernés, les signaux de geste et de mouvement sont considérés au cas par cas en fonction des besoins immédiats. Soit aucun format n'est utilisé (les données sont enregistrées « en brut »), soit on a recours à des formats très divers et souvent non standardisés. Notre analyse de ces formats est présentée dans [Luciani et al.06a] [Luciani&Evrard.07] [Luciani.07c]²². Les principales conclusions en sont les suivantes :

1. La plupart des formats, et en particulier tous ceux qui sont en lien avec les techniques du *motion capture*, structurent les « données de mouvement » (e.g. des points en mouvement) sur la base d'un *squelette* tridimensionnel hiérarchique ; l'information de mouvement est alors stockée sous la forme d'une déformation de ce squelette, que ce dernier soit explicite ou sous-entendu.
2. La plupart des formats ont recours à un encodage textuel des données – par opposition à un encodage binaire. Les quelques formats binaires existants sont limités à des mouvements de points dans un espace uniquement tridimensionnel et n'offrent pas de liberté quant au type binaire employé (e.g. : choix entre encodage entier ou flottant).
3. La plupart des formats organisent les données au moyen de la notion de *trajectoire* : on trouvera ainsi dans le flux d'information, par exemple dans le fichier, les trajectoires de chaque élément les uns après les autres. A l'inverse, peu de formats ont recours à un encodage entrelacé.
4. Nombre de ces formats sont propriétaires et/ou liés à certaines catégories de systèmes d'acquisition du geste ou à certaines catégories d'applications ; peu de formats sont publics et un nombre encore plus restreint est accompagné d'une justification scientifique de leur genèse et de leur domaine d'usage – à tel point qu'on peut supposer que ce sont les « besoins pratiques de l'instant » qui ont gouverné leur conception et leurs utilisations.

Dans la lignée de ces études bibliographiques, nous avons entrepris, au sein du groupe ICA-ACROE et sous la direction d'Annie Luciani, la conception d'un nouveau format dédié à la structuration et l'encodage à bas niveau des signaux de geste et de mouvement.

²² une liste commentée est également disponible dans l'article *Wikipedia* démarré à l'occasion de ce travail : http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_motion_and_gesture_file_formats

Les articles [Luciani et al.06a_#] [GMS.06_#] expliquent que le « signal de geste et de mouvement » est appelé à jouer un rôle de plus en plus essentiel dans ces domaines, à la fois en tant que données pouvant être captées, générées, partagées, archivées, analysées ou encore éditées et en tant que pivot entre environnements logiciels, entre périphériques et environnements, ou entre domaines applicatifs.

Ces articles défendent ensuite l'idée qu'il n'y a pas de différence de *nature* entre les signaux « de geste » ou « traces gestuelles » acquis au niveau d'un périphérique gestuel et les signaux « de mouvement » utilisés en entrée des applications de réalités virtuelles, ou générés par des systèmes de synthèse de mouvement tels que les modèles physiques en synthèse d'image. Ce type de signal peut par exemple concerner le passage entre la capture du mouvement et la synthèse d'image ; celui entre la transduction du geste ou la synthèse du mouvement et la synthèse de son ; ou encore celui entre la synthèse du mouvement et l'image ou le retour d'informations à des périphériques gestuels haptiques ; etc.

Une analyse des caractéristiques essentielles des signaux de geste et de mouvement met ensuite en évidence les propriétés suivantes :

- La **variabilité morphologique** de ce type de signaux. Elle concerne d'abord la variabilité dimensionnelle : signal élémentaire de geste ou de mouvement 1D, 2D, 3D ou ND. Elle concerne également la variabilité structurelle : corrélation entre plusieurs signaux élémentaires qui doivent être considérés ensemble pour former un tout signifiant (e.g. clavier musical à N touches, mouvement corporel à N degré de liberté, etc).
- **L'analyse quantitative** des plages concernées. 1/ au niveau temporel : le signal de geste et de mouvement concerne une plage de fréquence de quelques Hz à quelques dizaines de KHz suivant le contexte applicatif. 2/ en terme de plage de valeurs : contrairement par exemple au signal sonore, le signal de geste ou de mouvement n'est pas centré ; un encodage flottant n'est en conséquence pas toujours adapté. 3/ en termes de quantité d'information véhiculée par ce type de signal : elle peut être très importante du fait en particulier de la variabilité structurelle.
- Le **typage des valeurs** concernées. Les variables portant la trace du geste ou le mouvement peuvent être de nature extensive (positions, angles...) ou intensive (forces, moments...).
- Les **conditions de génération et d'utilisation** de ce type de signaux ; ils doivent, en particulier, pouvoir être générés ou utilisés dans le contexte de systèmes temps réel.

Sur la base de ces analyses, le groupe de travail a introduit le format *Gesture and Motion Signal*, GMS, qui amène plusieurs innovations par rapport à l'état de l'art. GMS est un format permettant de structurer et d'encoder, à bas niveau, les signaux de geste et de mouvement. Il accepte l'encodage de *positions* ou de *forces* de dimensionnalité quelconque. Les variabilités spatiale et structurelle sont portées par une structuration des signaux élémentaires (les *voies* ou *tracks*) en *canaux* (*channels*) puis en *unités* (*units*). Le codage est optimisé pour la gestion de flux de données importants, servant les besoins des applications temps réel. GMS est ainsi l'un des seuls formats ayant recours à un encodage binaire entrelacé. Il supporte enfin la plage de fréquences et les domaines de valeurs mis en évidence par notre analyse.

Outre qu'il a fait l'objet de plusieurs publications scientifiques, le format GMS a été déposé auprès des autorités de gestion de formats de fichier et disséminé par Internet et au moyen d'une librairie *libgms* sous licence *Open Source* [GMS.06].

Ma participation à l'ensemble de ces travaux a été double. J'ai tout d'abord été impliqué dans la coordination de l'étude collaborative de l'état de l'art, au sein du réseau *Enactive Interfaces* puis dans la communauté de l'informatique musicale. J'ai par ailleurs accompagné la spécification du format GMS et sa dissémination, et coordonné son implantation dans la librairie *libgms*.

Au sein du groupe, GMS est désormais l'unique format utilisé pour manipuler les signaux de geste et de mouvement, tels que ceux portant la trace d'une interaction gestuelle ou ceux produits par les modèles conçus dans l'environnement MIMESIS. Son existence – et il s'agit là d'une de mes motivations pour ces travaux – aura ainsi permis d'affirmer, à la fois au niveau conceptuel et au niveau pratique, le caractère essentiel de ce type de signaux et des informations qu'ils portent pour nos travaux et au delà de nos travaux dans les communautés concernées. En effet, avec l'existence d'un format tel que GMS, le *geste* et le *mouvement* acquièrent un nouveau statut : celui de données pivot essentielles, pouvant être produites, structurées, archivées, échangées... et mis en forme pour être rendues visibles.

3.4 Problématique de la « mise en image » dans le contexte des réseaux physiques masses-interactions : technologies pour la mise en forme du mouvement, vers un habillage des mouvements à base topologique

Responsable	A. Luciani
Chercheurs impliqués	A Luciani, M Evrard, A Allaoui, K Sillam, N Castagné, S Kalantari (ACROE-ICA) P Meseure, X Skapin, E Darles, B Crespin, T Jund (XLIM)
Temporalité de mon implication :	depuis 2007.
Contexte de mes travaux	Ingénieur de Recherche, puis Maître de Conférences. Projet interne au groupe, puis soutenu par le projet ANR DYNAMÉ. Sous la responsabilité d'A Luciani.
Thèses :	participation encadrement des thèses de Kevin Sillam [Sillam.11] et Ali Allaoui [Allaoui.10]
Autres co-encadrements :	co-encadrement post-doctorats de A Allaoui et T Jund. 3 Stages M2 ou PFE. Techniciens.
Publications :	[Evrard et al.06a_#], [Luciani et al.14a_#]

Ces travaux se mènent dans l'équipe « technologies pour les arts visuels dynamiques » dirigée par A. Luciani.

Nous synthétisons dans ce paragraphe notre participation aux travaux visant à l'élaboration de méthodes et d'environnements logiciels pour la « mise en forme » et la « mise en image » des mouvements produits par le calcul des réseaux physiques masses-interactions.

Les mouvements, encodés au moyen du format GMS, sont portés par un nuage de points, sans extension spatiale et sans structure.

La question de la reconstruction à partir de données ponctuelles brutes, d'une structure visualisable, statique ou animée, est connexe à plusieurs catégories de travaux scientifiques : tomographie (géologie, imagerie médicale...), *scanner* tridimensionnels, capture de mouvement, visualisation scientifique... Plusieurs procédés ont été proposés dans ces contextes, tels que : les surfaces implicites, le contrôle de squelette, la mise en correspondance d'une forme prédéfinie avec une série temporelle de points de contrôle, etc. Ces techniques présentent à des degrés divers, un intérêt pour la mise en forme des mouvements générés par un réseau physique et certaines ont été mises en œuvre par l'équipe image. Toutefois, plus que d'avoir recours à telle ou telle technique particulière, l'ambition d'un outil générique pour la création visuelle avec les réseaux physiques, telle qu'elle est portée par le groupe, nécessite que le créateur soit à même de choisir et de maîtriser avec précision les mécanismes de la « mise en forme » des mouvements, en accord avec son propos artistique.

La problématique de la mise en forme et de la mise en image des mouvements produits par les réseaux physique est donc un axe de recherche à part entière au sein du groupe, dont l'objet est de mettre à jour et d'étudier un ensemble de procédés complémentaires, ainsi que les moyens de leur mise en œuvre dans un projet artistique. Ces recherches se sont développées suivant trois axes :

- l'association libre de formes à des mouvements à l'aide des fonctionnalités de formes existantes dans MIMESIS ;
- « la mise en espace du mouvement par son empreinte sur un milieu actif - procédé de « gravure dynamique » ;
- la modélisation de formes et leur contrôle par un mouvement physique, en aval de celui-ci, par l'introduction d'étages de modélisation topologique explicite.

A côté du conseil en développement logiciel concernant les deux premiers points (ajout de formes dans le logiciel MIMESIS et implémentation de l'environnement logiciel de Gravure Dynamique) j'ai plus particulièrement participé aux recherches relatives au troisième axe, qui se sont déroulées depuis 2010 dans le contexte du projet ANR DYNAMÉ²³.

Il s'est agi de mettre en place des procédés d'habillage tout à fait nouveaux, qui s'appuient sur une représentation des objets à base de modèles topologiques. Les travaux se sont intéressés notamment à la conception et à la réalisation de processus génériques de mise en correspondance (mapping), depuis l'espace des mouvements considérés, dans un espace topologique, incluant la possibilité de transformation de la topologie durant l'animation. Une idée directrice est que l'habillage soit basé sur un modèle topologique à base de carte combinatoire²⁴. Le recours à une carte combinatoire présente plusieurs intérêts fondamentaux, tels que :

- Le fait que les cartes combinatoires permettent la séparation des deux types de manipulation : la manipulation de la structure des objets, qui se fait par la définition de cellules topologiques au moyen des relations d'involution entre brins, et la manipulation de la mise en espace de ces objets, qui se fait au moyen de la notion de plongement géométrique de cartes topologiques ;
- Le fait que les cartes combinatoires permettent de garantir la rectitude topologique des maillages manipulés, même lors de modifications complexes de la topologie, au moyen des opérations de transformation topologique définies par le formalisme ;

²³ « Le projet DYNAMÉ [2009-2013] est soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche, appel CONTINT. Il associe le laboratoire ICA, l'institut de recherche XLIM (Université de Limoges/CNRS) et le laboratoire Lutheries - Acoustique - Musique LAM (Institut Jean le Rond d'Alembert). Le projet est coordonné par A. Luciani. <http://acroe.imag.fr/proj/dyname>.

« Le projet a pour objectif central de développer de nouvelles extensions des outils de synthèses d'images animées en associant pour la première fois des outils de modélisation physique particulière avec des outils de modélisation topologique. Il s'agit ainsi de commencer à apporter une solution conceptuelle aussi générique que possible pour la modélisation d'animations de phénomènes dynamiques qui présentent des changements topologiques et morphologiques importants, tels que des fractures, des déchirures, des recollements, etc. En effet, pour tous ces cas, la littérature scientifique ne nous propose que des solutions dites ad-hoc – ou one shot model. Les principes de modélisation choisis sont les formalismes génériques masses-interactions pour la modélisation physique et les G-cartes combinatoires pour la modélisation topologique. (...) Les travaux théoriques ont porté sur les manières de formaliser les changements d'état à la fois du côté du modèle physique et du côté du modèle topologique. » [RapAct.12_#].

²⁴ Les cartes topologiques permettent de représenter des objets subdivisés, c'est-à-dire partitionnés et structurés en cellules topologiques de différentes dimensions : sommets, arêtes, faces, volumes, etc.

En nous appuyant sur les travaux expérimentaux antérieurs menés dans l'axe 2 de DYNAMÉ [Jund et al.12] [Darles et al.11], nous avons contribué à la réalisation d'un système pour l'habillage topo-géométrique, nommé MORPHO-Map [Luciani et al.14a_#] [Luciani et al.14b_#].

Du point de vue des technologies logicielles, le procédé d'habillage du mouvement supporté par ce système a ceci de particulier – et d'intéressant – qu'il nécessite une maîtrise fine de la transformation au cours du temps, sous contrôle des points en mouvement, d'une catégorie de données complexes et très structurées : la carte topologique.

Nous avons tout d'abord établi pas à pas une formulation modulaire des processus de *mapping* topo-géométrique identifiés préalablement dans le projet, sous la forme d'une collaboration de sous-processus.

Nous séparons le sous-processus *d'animation*, dont le rôle est de calculer, à chaque pas de l'algorithme de rendu, le plongement du modèle topologique sous la forme d'un maillage métré, du sous-processus de *modification topologique*, qui conduit à transformer la carte topologique au moyen des opérations de transformation topologique.

Le sous-processus *d'animation* s'appuie sur les procédés de plongement topo-géométrique propres aux cartes combinatoires. Une fonction de plongement géométrique permet de calculer les évolutions des *vertex* d'un maillage géométrique à partir de l'état du nuage de point en mouvement. Nous proposons dans ce contexte un mécanisme de *clusterisation* afin d'exprimer la possibilité que plusieurs fonctions de plongement géométrique soient utilisées pour différentes parties du modèle topologique et des points en mouvement.

L'expression et le calcul des *modifications topologiques* sous contrôle des points en mouvement constituent une étape particulièrement complexe. Nous proposons de l'organiser en plusieurs sous-processus élémentaires. La *captation* consiste à capter des informations dans le nuage de points en mouvement pour déclencher et paramétrer les processus de modification. La *sélection* consiste à déterminer, à partir des données captées, les cellules topologiques qui doivent subir des modifications. Vient ensuite l'étape de *modification topologique* elle-même, que l'on exprime au moyen des opérations topologiques élémentaires définies par le formalisme des cartes combinatoires (couture, dé-couture, subdivision, raffinement...). Enfin, la *mise à jour* consiste à réajuster l'ensemble du *pipeline* (animation, captation, sélection, ...) pour tenir compte des modifications topologiques qui ont eu lieu.

Cette dernière étape de *mise à jour* constitue une des difficultés inhérentes à l'approche. Par exemple, chaque fois que, sous l'effet du mouvement, l'algorithme procède à la couture ou la dé-couture d'arrêtes ou de faces dans le modèle topologique, ou encore lorsque de nouvelles cellules topologiques sont créées dans le modèle topologique, par exemple par raffinement de cellules existantes, il est nécessaire de reconditionner la chaîne algorithmique. Ceci est valable aussi bien pour la partie qui déclenchera les futures modifications que pour la partie qui détermine le plongement géométrique de chaque cellule topologique ou encore le rendu visuel. Au delà de ces aspects algorithmiques, en eux-mêmes délicats, il est également nécessaire que l'utilisateur soit à même de spécifier les mécanismes de ces auto-adaptations de l'ensemble de l'algorithme.

Dans un second temps, dans le courant de l'année 2012-2013, nous avons proposé un système logiciel prenant en compte ces particularités en permettant à l'animateur de modéliser son *pipeline* topo-géométrique auto-évolutif et modulaire, puis de l'exécuter.

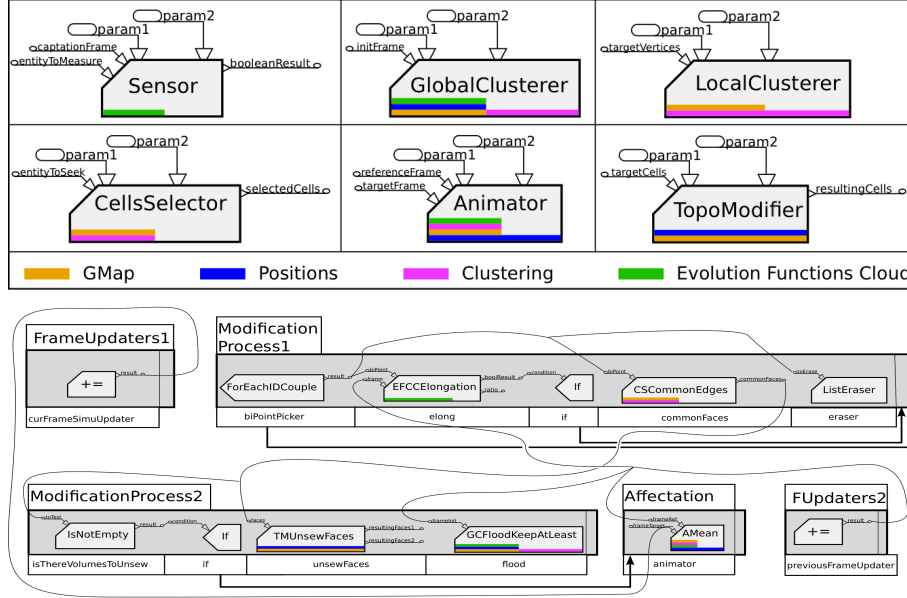


Figure 12. Le système modulaire MORPHO-Map-3 du XLIM et de l'ICA pour l'habillage topo-morphologique auto-évolutif des mouvements générés par modèles physiques.

En tant que système logiciel, l'environnement prototype MORPHO-MAP-3 (figure 12) se présente, en première analyse, comme un système de type *bloc-diagram*, chaque bloc réalisant une partie des traitements topo-géométrique (capture, détermination des cellules affectées, modification de la G-Carte, mise à jour des clusters, animation, etc.). Mais il se distingue toutefois fondamentalement du formalisme *bloc-diagram* à deux niveaux essentiels.

Tout d'abord, il n'est pas uniquement un système de traitement de flux de données : en sus des données de flux échangées entre blocs de traitement conformément aux principes « *box-and-wire* » aujourd'hui usuels, le système repose sur une notion originale de « variables globales ». Ces variables globales sont transversales à tout le processus ; elles peuvent être consultées ou modifiées transversalement par n'importe lequel des blocs. Le nuage de points en mouvement, la G-Carte et les *clusters* sont ainsi des variables globales.

Ensuite, constatant que l'écriture d'un *pipeline* d'habillage à base topologique nécessite une maîtrise précise de l'organisation séquentielle des traitements, nous proposons d'adjoindre au principes des « *bloc-diagram* » des moyens de contrôle du flux d'exécution des algorithmes : sauts conditionnels, expressions conditionnelles, boucles, etc.

Cette activité aboutissant au logiciel MORPHO-Map-3 a impliqué majoritairement le laboratoire XLIM de Poitiers et en particulier A Allaoui, post-doctorant. Cependant, la participation du groupe ACROE-ICA et ma propre participation ont été fortes pour guider les objectifs et les spécifications logicielles. Les résultats sont publiés dans [Luciani et al.14a_#][Luciani et al.14b_#].

4 Vers une suite logicielle générique pour la création avec les réseaux physiques

Responsable	N. Castagné
Chercheurs impliqués	A Luciani, C Cadoz, JL Florens, N Castagné, A Allaoui
Temporalité de mon implication	: depuis 2007.
Contexte des travaux	Ingénieur de Recherche, puis Maître de Conférences. Projet interne au groupe, puis soutenu par le projet ANR DYNAMÉ.
Publications	: [Castagné et al.09_#] [Castagné&Cadoz.09_#] [Castagné et al.14-en cours] Autre publications en cours de rédaction.
Co-encadrements	: Participation aux travaux de thèse d'Ali Allaoui. 5 stages M2 ou PFE. Ingénieurs et techniciens.

A partir de 2006, fort d'un recul de plus de 10 ans sur ses environnements logiciels et leurs usages, le groupe a entrepris un profond travail de synthèse et de refondation de ses environnements de modélisation/simulation physique. J'ai dans ce contexte pu réinvestir une part de l'expertise acquise au cours des travaux sur GENESIS et MIMESIS pour progressivement aborder la problématique des environnements de modélisation dans un cadre plus général, au delà donc du contexte de la création musicale ou de la création visuelle.

De façon très générale, il s'agit à termes de questionner la pertinence de la modélisation et de la simulation physiques dans d'autres espaces de création et d'identifier les principes logiciels permettant de révéler cette pertinence pour diverses formes d'expression artistique. Ce travail a, en outre, donné lieu à un re-positionnement et un re-développement des environnements logiciels du groupe, de leurs ergonomies et de leurs attendus. Il prend corps dans de nouvelles versions des modeleurs-simulateurs au sein d'une suite logicielle pour la modélisation avec les réseaux physiques baptisée, en anglais, la *Physics Network Suit*.

4.1 Considérations sur les activités de conception et développement logiciel dans le contexte Art Science Technologie

Travaux et analyses non encore publiés.

Le travail sur la *Physics Network Suit* a été accompagné d'une analyse, puis d'une profonde transformation, que j'ai coordonnées, des pratiques du groupe ACROE-ICA en matière de conception et de développement logiciel. Le mode de fonctionnement de ces activités dans le groupe nous semble se distinguer de façon suffisamment nette des pratiques usuelles de la recherche pour qu'il soit intéressant d'en consigner ici brièvement certains des traits marquants.

4.1.1. Une recherche centrée sur l'invention et la caractérisation de nouveaux « paradigmes logiciels »

La réalisation d'environnements logiciels au sein du groupe ACROE-ICA est un champ de recherche en soi, qui donne lieu à production de connaissance. Cette recherche embrasse plusieurs lignes de progression, dont les principales sont probablement :

- 1) L'analyse des transformations des processus de création qu'accompagnent et stimulent nos logiciels, ce jusqu'à une caractérisation précise de ces processus. Cette analyse peut être partiellement rétroactive (basée sur l'observation de processus de création, par

exemple menés au moyens de versions anciennes des logiciels) mais elle est nécessairement avant tout prospective, en ce qu'il s'agit de permettre l'invention et l'expérimentation de nouvelles démarches créatives *qui ne sauraient exister sans ces logiciels*.

- 2) Le positionnement des technologies produites dans l'histoire scientifique et technologique des outils de création et de réalité virtuelle, incluant une analyse des discours scientifiques, technologiques et/ou artistiques tenus sur ces outils au cours de l'histoire.
- 3) Enfin, l'invention et la conception des environnements logiciels eux-mêmes, de leurs fonctionnalités et de leurs ergonomies, et leur positionnement dans le domaine des interfaces homme-machine.

Ce dernier point constitue en lui même un défi du fait de la nouveauté des concepts en jeu, qu'il s'agit de médiatiser, et de la nouveauté des méthodologies de création rendues possibles par l'existence même des logiciels.

Chaque grande famille de logiciels (qu'il s'agisse des éditeurs de texte, des tableurs, ou dans le monde du multimédia des logiciels de synthèse d'image 3D, de montage vidéo, de synthèse de son, de séquençement sonore, etc.) est issue d'un lent processus de recherche et de maturation, qui a progressivement permis d'identifier les algorithmes, les structures de données, les concepts-noyau, les outils et les ergonomies adéquats à l'activité sous-jacente. De la même manière, les concepts manipulés dans le groupe, tel que celui des réseaux physiques, appellent à leur tour que soient recherchés les principes logiciels adéquats, qui confèrent à l'utilisateur les moyens de développer sa créativité et d'atteindre dans ses travaux des niveaux importants de complexité. L'objet de cette recherche est ainsi d'inventer, de caractériser, de valider et enfin de positionner ce qui constitue l'essence de ces nouveaux « paradigme logiciel ».

Ce travail nous amène donc à donner naissance progressivement à une nouvelle catégorie de logiciels, avec leurs principes et leurs ergonomies dédiés, qui permettent que soit révélée la portée du formalisme de modélisation physique masses-interactions. Cette catégorie est appelée à se développer en parallèle d'autres familles d'environnements et ergonomies tels que les modeleurs 3D, les séquenceurs musicaux, les logiciels de synthèse et de réalité virtuelle, et plus généralement chacune des catégories de logiciels utilisées pour la création et issus des recherches dans le domaine art-science-technologie.

4.1.2. Éléments méthodologiques : la « création d'outils pour la création »

Les logiciels conçus au sein du groupe ACROE-ICA permettent de nouvelles approches de la création avec l'ordinateur. Leur conception s'accompagne de l'invention de nouveaux processus de création, qui par nature n'adressent aucune activité préexistante. Nous ne cherchons pas à optimiser une activité prédéfinie, mais plutôt à développer l'expressivité et la créativité. La conception de ces environnements ne peut donc se ramener exclusivement aux méthodologies usuelles du domaine de l'Interaction Personne-Système (ou Homme-Machine) et de la conception d'interface, telles que les méthodes dites « centrées utilisateur » ou « d'analyse des tâches ». Pour soutenir notre travail de conception des environnements logiciels, nous avons affiné année après année des éléments méthodologiques, que nous qualifions de « création d'outils pour la création ».

Avec cette méthodologie, la « raison d'être » de l'outil elle-même s'invente au fur et à mesure de la conception. Autour de quelques objectifs communs, tel que par exemple la volonté du portage aux usages des réseaux physiques masse-interaction, il s'agit bien non seulement de concevoir un logiciel, mais encore d'inventer les processus de création qu'il permet, dans une interaction mêlant trois types de points de vue : scientifique, technologique et artistique. L'outil (l'environnement logiciel) apparaît alors comme le moyen qui permet de mettre en œuvre ce processus commun de co-conception. Il devient le vis-à-vis objectif des processus de création qu'il permet ; il en est la représentation – on dira : la réification. Il constitue la condition de la démonstration des idées qu'il porte – d'où la notion de « démonstration par l'outil ».

Par ailleurs, dans cette démarche, la collaboration avec des utilisateurs est nécessaire et continue. Elle participe activement à la maturation des logiciels. C'est l'une des raisons d'être essentielle des réseaux d'utilisateurs et des *wokshops* organisés régulièrement – au delà, ou en amont, de leur rôle de « dissémination des résultats de la recherche » à la société. C'est, également, l'une des raisons pour lesquelles les logiciels produits doivent dépasser le statut de prototypes ou de « preuves de concepts » en atteignant le niveau de véritables outils, fiables, utilisables, suivis – quand bien même ils sont inventés année après année.

4.1.3. De la nécessaire articulation entre recherche et développement

De par l'objet même du programme du groupe, les activités de conception et de développement logiciel ne peuvent se limiter à la production de logiciels « preuve de concept », dont l'éventuelle finalisation serait confiée à un processus industriel ultérieur chargé d'adresser la dissémination, comme c'est souvent le cas en recherche.

D'une part, les logiciels réalisés sont nécessaires à d'autres activités de valorisation, de pédagogie, de création et de recherche du groupe. D'autre part, cette activité ne trouve son point d'aboutissement et ne peut être évaluée que par une confrontation approfondie des concepts produits à l'expérience *in situ* – en particulier, donc, à la création. Pour ces deux raisons, et incidemment conformément aux missions confiées au groupe par l'une de ses tutelles, le Ministère de la Culture, les logiciels produits, au delà de la « preuve de concept », doivent nécessairement atteindre un niveau de finition et de qualité permettant leur utilisation intensive et effective par des artistes dans les domaines et activités qu'ils adressent, et ce à un niveau professionnel.

La conception et le développement logiciel sont donc des activités structurantes au sein du groupe, qui nécessitent de trouver un équilibre entre recherche, expérimentation, prototypage (par exemple dans le cadre d'un projet ou d'une thèse) et conception et suivi de véritables *produits logiciels*²⁵. Cette situation relativement originale dans le monde de la recherche a conduit à la mise en place d'éléments méthodologiques et de moyens humains et matériels qui nous apparaissent particuliers dans le domaine du Génie Logiciel.

Dans le cadre de nos activités liées à la réalisation des environnements de modélisation, nous avons maintenu une réflexion constante sur les processus et outils de conception et de développement logiciel, dans l'objectif de les amener au niveau nécessaire et suffisant de maîtrise de la qualité. Nous avons mis en place un ensemble de moyens et méthodes pour répondre aux spécificités des activités de conception et développement de ses environnements logiciel. Il s'agit d'abord d'un équilibre entre d'une part une répartition des activités de conception et développement sur les différents projets et équipes, seul à même de permettre à chaque projet ou équipe de disposer de la liberté nécessaire à son travail de recherche, et d'autre part une mutualisation inter-équipe des savoir faire, des moyens humains et des outils, seule à même de garantir la qualité, le suivi et la cohérence d'ensemble des produits logiciels. Il s'agit ensuite de l'élaboration progressive d'un « savoir faire » en matière de conception et d'implantation. Ce savoir faire se construit, s'échange et se transmet via des échanges continus entre concepteurs logiciels et dans des rapports internes. Il s'agit enfin du choix commun, de la mise en place et de la maintenance d'un ensemble d'outils relevant du génie logiciel, à même de soutenir les activités : outils de conception UML, environnement de développement intégré multiplateforme, gestionnaire de version, suivi produit, *packageur*, etc.

²⁵ A titre d'exemple du suivi mis en œuvre, signalons que nous maintenons une stricte compatibilité ascendante entre les versions. Ainsi, par exemple, les modèles créés il y a plus de 15 ans sur des plateformes Unix sont-ils toujours lisibles et simulables aujourd'hui sur Macintosh.

4.2 Positionnement du projet *Physics Network Suit*

Les travaux sur les environnements GENESIS et MIMESIS ont d'abord été menés de manière relativement disjointe au sein respectivement de l'équipe « technologies pour les arts visuels dynamiques » et de l'équipe « technologies pour les arts musicaux ». Comme nous l'avons rappelé au début de ce chapitre, le groupe a entrepris en 2006 de synthétiser et de refonder ses environnements de modélisation/simulation physique.

Dans ses dimensions conceptuelles, ce travail questionne la convergence des principes qui ont été considérés jusqu'ici pour ces logiciels. Il implique de ce fait l'ensemble des chercheurs du groupe. Il s'agit de clarifier la structure sous-tendant l'activité de modélisation avec les réseaux physiques, quel que soit le type de modèle concerné, ainsi que les principes logiciels (concepts-noyau, structures de données, éléments ergonomiques...) susceptibles de servir de base commune. Ce faisant, il s'agit de restructurer dans un cadre commun les fondations même de ces logiciels et des processus de création nouveaux qu'ils adressent, mais aussi d'ouvrir de nouvelles perspectives pour des travaux futurs.

En matière d'ingénierie logicielle, ce travail vise la conception de briques logicielles réutilisables, évolutives et multi-plateforme (bibliothèques, exécutables communs, langage de script, élément d'interface, etc.), de telle sorte que ces briques soient à même d'être déployées dans de nouvelles versions des modélisateurs / simulateurs physiques du groupe, qu'ils soient dédiés à la création musicale, la création visuelle, la création multisensorielle ou à tout autre type de modèles masses-interactions formulés avec CORDIS-ANIMA. Ce faisant, une refonte complète des environnements de modélisation du groupe est en cours, avec réécriture de la totalité du code, qui se concrétise progressivement dans la famille de logiciels déjà mentionnée sous le nom de *Physics Network Modeling Suit*.

4.3 Une analyse de l'activité de modélisation

Ces travaux sont partiellement publiés dans [Castagné et al.09] [Castagné&Cadoz.09]. Voir également [Luciani.11].

Ce travail mené en commun et dont nous projetons la publication, a été fondé sur une analyse de modèles, existants ou souhaités, et de processus de modélisation, employés par le passé ou en devenir.

4.3.1. Processus de modélisation par construction « bas-haut » et phases de modélisation

Rappelons qu'une première propriété essentielle de l'activité de modélisation avec les réseaux physiques est qu'elle est un processus « bas-haut », fondé sur une *construction*, un *assemblage* par le modélisateur de modules élémentaires formant un réseau. Cette propriété distingue notamment ce formalisme d'autres approches et techniques de modélisation.

En particulier, à l'inverse par exemple de la méthode des éléments finis dans le domaine de l'image, l'approche des réseaux physiques masses-interactions ne se fonde pas sur un maillage discrétisant la forme d'un objet, maillage sur lequel s'appuieraient des algorithmes « physiques ». De même, à l'inverse des méthodes basées sur la formulation d'équations différentielles ou aux dérivées partielles, issues par exemple de la physique du solide ou de l'acoustique, elle ne s'appuie pas sur des méthodes d'analyse, de discrétisation et de calculs numériques appliquées à des formulations mathématiques.

Avec les réseaux physiques, le modélisateur construit point à point le réseau en instanciant un à un des modules choisis dans une bibliothèque de modules, déterminant ainsi les propriétés physiques de chaque nœud et de chaque interaction entre nœud. Ainsi, si on a parfois recours à certains moments du processus à une certaine automatisation, génératrice de parties de réseaux présentant certaines régularités, ces mécanismes ne sont que des raccourcis du processus de construction, qui reste fondamentalement point-à-point.

Le processus de modélisation est par ailleurs structuré en 5 phases.

Tout d'abord, trois phases de préparation de la topologie du réseau et de ses propriétés :

- La phase PSQL (PréStructuration Qualitative) durant laquelle le modélisateur élabore la structure (la topologie) du réseau physique et détermine le type (donc la catégorie de comportement physique élémentaire) de chaque module.
- La phase PSQN (PréStructuration Quantitative), durant laquelle sont choisis les valeurs des paramètres physiques pour chaque module du réseau.
- La phase INIT (conditions initiales), durant laquelle les valeurs initiales des variables d'état de chaque module sont données.

Avec ces trois phases, le réseau est prêt à être calculé. Suivent deux phases :

- La phase HABILLAGE, durant laquelle l'utilisateur détermine les mécanismes au travers desquels les phénomènes générés se manifesteront à sa sensori-motricité. Pour le son, cette étape est simple et consiste en général en une désignation de quelques nœuds <MAT> du réseau, dont les signaux représentatifs des mouvements seront directement envoyés dans le fichier audio et finalement sur les haut-parleurs. Pour l'interaction haptique, cette phase est plus complexe et est encore objet de recherches. Il s'agit en particulier de choisir le routage des signaux ascendant et descendant sur les systèmes haptiques, ainsi que les rapports d'échelle physique entre les deux mondes : le monde de la simulation et le monde électromécanique des systèmes haptiques. Dans le cas des sorties visuelles enfin, la phase HABILLAGE est nécessairement complexe puisqu'elle adresse la question de la mise en forme du mouvement généré par la simulation. Nous y avons consacré un paragraphe complet dans la partie 3.
- Vient enfin la phase JEU, parfois appelée de manière réductrice SIMULATION, durant laquelle le modèle est simulé, en temps réel ou en temps différé, avec ou sans interaction de l'utilisateur.

Ce processus en 5 phases est naturellement itératif et la modélisation passe plusieurs fois d'une phase à l'autre, dans des ordres variables. Mais il s'agit bien de *phases* en ce que chacune d'elle requiert, lorsqu'elle est en cours, toute l'attention du modélisateur et fait souvent appel à une forme spécifique de l'interface machine – utilisateur. En outre, l'importance relative de ces phases en terme de récurrence n'est pas équivalente. A titre d'exemple, pour parvenir à un modèle devant générer un comportement souhaité ou à une série de variations souhaitées, la phase PSQN requerra souvent bien plus de temps que la phase PSQL, et la phase INIT parfois plus que la phase PSQN – étant entendu qu'un réseau physique, en tant que système dynamique, est par nature très sensible à ses paramètres physiques ainsi qu'à ses conditions initiales.

4.3.2. Nombre de modules

Le recours à un nombre très important de modules physiques, <MAT> et <LIA>, de l'ordre de plusieurs dizaines ou plusieurs centaines de milliers, est la norme plutôt que l'exception, dès lors qu'on dépasse les stades de modélisation élémentaires. Cette nécessité n'est pas due à la grande taille spatiale des phénomènes à modéliser, mais bien à la complexité des dynamiques elles-mêmes. C'est chose nécessaire d'abord dès lors qu'on veut obtenir certains comportements dynamiques complexes, comme par exemple des phénomènes visuels collectifs (empilages, vortex, accumulations, effondrements de surface...) [Luciani.04b] [Luciani.00] ou, dans le domaine sonore, des effets propres aux milieux propagatifs (résonateurs, effets spatiaux, effets de salle...). C'est chose nécessaire également dès lors qu'on s'intéresse à des modèles « composés » qui, dans une même scène, mettent en interaction des parties de modèles diverses – comme c'est le cas avec le processus de « composition de (ou avec les) modèles physiques » [Cadoz.02a] [Cadoz et al.11_#] expérimenté en création musicale.

Le très grand nombre d'entités utilisé dans la construction des modèles est sans commune mesure avec le nombre de « blocs » ou de « modules » usuellement manipulé dans les

environnements logiciels modulaires – par exemple dans les logiciels de synthèse sonore modulaire basés sur des blocs de traitement du signal ou dans les logiciels de CAO mécanique ou électronique, pour lesquels un modèle regroupe nominalelement un nombre bien plus faible d'éléments, typiquement de 10 à 1000.

A l'inverse bien sûr, ce nombre nominal de modules physiques est inférieur au nombre de polygones ou de facettes dans les maillages géométriques 3D complexes. Toutefois, si la facette est le plus souvent l'élément de plus petit niveau des scènes 3D, il n'est pas l'élément de base d'une activité de construction. N'étant pas dotée de comportement (d'algorithme), elle est davantage un constituant de la discrétisation de formes élémentaires qu'une entité que l'on considère pour elle-même. A l'inverse, les modules physiques d'un réseau masses-interactions sont les briques de base d'un processus de construction modulaire et ont chacun une « personnalité » sur laquelle l'utilisateur doit pouvoir agir individuellement.

Ainsi, le très grand nombre de modules est un élément structurant des modeleurs et simulateurs interactifs que nous concevons ainsi que des processus de leur utilisation. De la même façon, la complexité permise par les réseaux physiques naît de processus d'émergence dans des réseaux de grande taille en termes de nombre d'éléments simples.

4.3.3. Régularités et irrégularités dans les réseaux physiques masses-interactions

Nous observons ensuite que la modélisation avec les réseaux physiques suppose un équilibre fin entre régularité et irrégularité au sein du réseau. Cet équilibre se situe aussi bien au niveau de la topologie du réseau constitué de masses et d'interactions, qu'au niveau des paramètres physiques et de l'état initial des modules.

En matière de *topologie*, il apparaît que certaines catégories de réseaux ou de parties de réseaux sont à topologie régulière : topologie linéique comme dans un modèle de corde, structures planes pour la modélisation de comportements surfaciques de matériaux plastiques, structures tridimensionnelles à maille, modèle où tous les éléments matériels sont indifférenciés comme dans un fluide, etc. D'autres réseaux, tout aussi courants, nécessitent à l'inverse une topologie très irrégulière, dont la construction requiert des processus précis de connexion des éléments du réseau, module par module : réseau physique pour le mouvement d'une marionnette, véhicule, liaison physique entre différentes parties d'un macro-réseau, etc. Enfin, un autre cas important en pratique est celui où des irrégularités sont introduites au sein d'une structure à topologie régulière.

En matière de *paramètres physiques*, zones homogènes et zones très inhomogènes alternent. Il peut être en effet tout aussi signifiant que les paramètres soient « tous égaux » ou qu'ils soient « tous différents » - réglés suivant une loi de variation quelconque, ou réglés finement un à un, par exemple en introduisant, au cas par cas, des inhomogénéités paramétriques dans une structure à topologie régulière. A titre d'exemple, il est utile, durant la modélisation, de pouvoir rapidement repérer les zones homogènes et les zones inhomogènes dans un réseau.

Enfin, *l'état initial* des modules matériels (des « masses ») est nécessairement différent et réglé module par module.

L'équilibre entre régularité et irrégularité dans les réseaux physiques implique donc que tout module puisse être accédé individuellement. Envisagée en conjonction avec la nécessité d'un très grand nombre de modules, cette propriété structure, à nouveau, l'activité de modélisation et donc les outils la supportant : organisation de l'activité de l'utilisateur, interface, structure de données, optimisation, outils de manipulation, ergonomie, etc.

4.4 Le langage de modélisation PNSL

Travaux partiellement publiés [Castagné&Cadoz.09_#] [Castagné et al.09_#] ; une publication spécifique est prévue.

Compte tenu des observations exposées ci-dessus quant aux spécificités de l'activité de modélisation, nous posons que l'existence d'un langage pouvant accompagner la totalité du processus de modélisation en le programmant, est chose indispensable dans le contexte des réseaux physiques, et non pas optionnelle comme c'est en général le cas dans les interfaces. La raison d'être d'un tel langage tient en quelques points :

- La formulation axiomatique et modulaire de CORDIS-ANIMA fait que le formalisme constitue en lui-même un « langage conceptuel » pour la modélisation. Contrairement à d'autres approches, il se prête ainsi naturellement à une traduction en un langage informatique opératoire, à même de supporter une activité effective de modélisation.
- Compte tenu du très nombre de modules et de la nécessaire cohabitation de parties régulières et irrégulières dans le réseau, la possibilité de recourir à un langage en lieu et place d'une interaction à la souris au moyen d'une interface graphique à manipulation directe ou WIMP²⁶ présente ici des intérêts évidents. Il est en effet connu qu'un langage permet d'exprimer de façon efficace des opérations complexes (telle que l'édition de réseaux à topologies complexes), de spécifier des enchaînements d'opérations et d'exécuter des actions répétitives (telle que le calcul et l'affectation d'un grand nombre de paramètres suivant une loi quelconque), de désigner un élément dans une multitude (par exemple pour modifier un état initial), etc.
- Plus essentiellement, le principe d'un langage s'avère approprié dans les domaines d'activité formelle ou les tâches qui tirent partie d'un haut degré d'abstraction, dès lors qu'il s'agit de tirer parti au mieux des possibilités de l'ordinateur quant à la manipulation de concepts. Or, l'activité de modélisation avec les réseaux physiques est par nature une activité conceptuelle : il ne s'agit pas de décrire des « choses », des « objets » dont on connaîtrait les propriétés, comme par exemple on le fait en graphique 3D, mais de modéliser des *comportements*.
- De par ses principes mêmes, la manipulation directe d'une représentation graphique d'un réseau masses-interactions tend à laisser croire que la représentation graphique du modèle *serait* le modèle, et plus profondément encore que le modèle *serait* la chose modélisée. A l'inverse, un langage porte en lui la possibilité, dès la prise en main du logiciel et les premiers pas en modélisation, qu'un décadre soit opéré entre la « chose » et le modèle, ou encore entre l'idée qu'il ne s'agirait que de « dessiner des objets », pour aller vers l'incorporation de ce qu'est *in fine* l'activité formelle de modélisation de comportements dynamiques.
- Enfin, alors que la manipulation directe et les interfaces WIMP correspondent à des actions rapides, incrémentales, qui se réalisent essentiellement dans la modification de l'état de « l'objet d'intérêt », l'usage d'un langage permet de rendre tangible le *processus* de modélisation lui-même : le texte (le programme) constitue en effet une représentation de ce processus. Nous reviendrons sur cet aspect ultérieurement.

La conception du langage PNSL, *Physics Network Scripting Language*, entreprise en 2007, donne corps à ces raisons d'être fondamentales. Le langage PNSL est le premier langage de script générique dédié à la modélisation avec les réseaux physiques masses-interactions, tels que formalisés dans CORDIS-ANIMA. Il est le point d'aboutissement des langages proposés antérieurement à cette fin par le laboratoire, en particulier dans la version initiale de MIMESIS [Evrard et al.06a_#].

²⁶ *Windows, Icons Menus, Pointer*. Cet acronyme désigne les principes communs aux interfaces graphiques, à manipulation directe ou non, qui sont aujourd'hui d'usage le plus courant dans les ordinateurs usuels.

Nous résumons ci dessous quelques-unes des spécificités du langage PNSL [Castagné&Cadoz.09] : « *PNSL est un langage de script impératif – construit sur le langage Tcl. A ce titre, il n’a pas été conçu pour permettre une description [à plat] des modèles, mais bien pour les programmer – c’est à dire pour accompagner le processus de modélisation.*

PNSL est un langage de modélisation. A l’inverse de nombre des langages incorporés dans les interfaces, qui offrent des commandes permettant de manipuler l’interface, PNSL est focalisé sur le modèle et sur sa conception suivant les règles du formalisme CORDIS-ANIMA. (...) Le langage permet de travailler au plus près de ce formalisme : il offre toutes les commandes permettant d’instancier, de labéliser, de connecter, de paramétrer, d’initialiser, etc. [un à un chacun des] modules d’un réseau.

PNSL est générique dans le contexte de CORDIS-ANIMA ; il est adapté à n’importe quel type de modèle, quelles qu’en soient la dimensionnalité (unidimensionnel, 1D, 2D, 3D), ou les catégories de phénomènes sensibles qu’il génère (image animée, son...). Il est en outre conçu pour permettre à terme la collaboration [dans un même modèle] de parties de dimensions, de fréquences et d’échelles différentes. (...)

PNSL a été conçu pour pouvoir être utilisé avec des modèles de grande taille, allant jusqu’à comprendre plusieurs centaines de milliers de modules, ce aussi bien en termes d’efficacité que de pouvoir expressif. [En particulier, PNSL propose un système d’expressions régulières] qui permet la désignation aisée d’un nombre quelconque de modules. Par ailleurs, toutes les commandes du langage permettent de manipuler élégamment un très grand nombre de module.] »

4.5 Un système original de labellisation pour soutenir la navigation dans les modèles complexes

Travaux partiellement publiés [Castagné&Cadoz.09_#] [Castagné et al.09_#] ; une publication spécifique est prévue.

Dans les systèmes interactifs qui donnent lieu à la manipulation de structures complexes à base de modules, les mécanismes les plus couramment proposés à l’utilisateur pour organiser cette complexité sont le *groupement* et l’*encapsulation*. Groupement et encapsulation reposent tous deux sur une structuration arborescente. Le groupement consiste à regrouper divers éléments de telle sorte qu’ils deviennent manipulables comme une entité unique. L’encapsulation ajoute au groupement le fait de cacher la complexité inhérente aux éléments groupés en leur substituant une représentation iconique. L’encapsulation permet ainsi de simplifier l’organisation de l’espace de travail et de réduire la charge cognitive de l’utilisateur, en masquant des niveaux de complexité lorsqu’il est inutile de les représenter.

Toutefois, les réseaux physiques masses-interactions ne se prêtent pas à une organisation arborescente, telle que portée par les principes du groupement et de l’encapsulation. Ni groupement ni encapsulation ne sont appropriés dans le contexte des réseaux physiques. En effet :

- Tout d’abord, le processus de construction point-à-point des réseaux et la nécessité d’une maîtrise fine des inhomogénéités structurelles, paramétriques ou en matière d’état initial nécessitent que chaque module reste à *tout moment* accessible *individuellement*. Le cas des connexions illustre cette assertion. Alors que, par exemple, dans un système modulaire de traitement du signal, il est possible de prédéterminer les entrées et sorties d’un « *patch* », n’importe quelle masse ponctuelle (ou <MAT> suivant la terminologie de CORDIS-ANIMA) d’un réseau physique est susceptible de recevoir de nouvelles connexions à n’importe quel moment. Par exemple, une plaque vibrante constituée de nombreux modules sonnera différemment suivant qu’elle est percutée au centre ou au bord. Prédéfinir un point d’excitation ne ferait alors pas sens puisque dans tous les cas l’utilisateur doit pouvoir le modifier immédiatement. De même, bien évidemment, rendre tous les <MAT> accessibles à la « surface » d’une hypothétique capsule serait absurde puisque cela rendrait caduque le bénéfice de l’encapsulation.

- Ensuite, il est par principe impossible de considérer strictement une sous partie dans le réseau comme un tout auto-consistant (e.g. un « groupe »). A titre d'exemple, quel est le statut d'un module d'interaction qui connecterait une « corde » à un « percuteur » ? Est-ce un élément de la corde, ou du percuteur ? La réponse est indécidable ; ou, plus précisément, elle dépend de la phase de travail de l'utilisateur.
- Enfin, plus fondamentalement, dans un réseau physique, toute partie interagit bi-directionnellement avec toutes les autres. En conséquence, toute modification portant sur une partie du réseau, qu'elle soit paramétrique ou structurelle, peut nécessiter, pour conserver un comportement cohérent à l'ensemble du modèle, de modifier en retour d'autres parties en interaction. Elle nécessite donc *a minima* de pouvoir accéder à ces autres parties immédiatement. De plus, les différentes phases de l'activité de modélisation requièrent de pouvoir considérer tour à tour des parties du réseau qui se *recoupent* entre elles.

Il apparaît donc qu'un réseau masses-interactions n'a pas une structuration unique. Si une structure émerge dans le cours d'un processus de modélisation, elle ne saurait être figée. Elle ne correspond qu'à une manière de considérer le réseau du modélisateur à un moment donné de son activité, ou à un besoin pratique pour réaliser certaines tâches de modélisation.

Pour soutenir l'utilisateur dans la manipulation de réseaux complexes ou de grande taille et la désignation à tout instant du processus de modélisation d'un module unique parmi la multitude, ou d'une sous-partie dans la totalité, nous avons proposé un « système de labellisation » original et flexible. Ce système prend la suite d'une proposition de A. Leclerc et A. Luciani formulée dans le contexte du langage existant dans les premières versions de MIMESIS. On trouvera une description succincte du système de labellisation dans [Castagné&Cadoz.09_#] [Castagné et al.09_#] – d'autres publications sont prévues.

De façon générale, le système de labellisation permet à l'utilisateur, de définir de façon libre, pour n'importe quel module, à tout instant, un nombre quelconque de noms quelconques, appelés *labels*. Tout module peut être ainsi référencé, sélectionné et manipulé au moyen de n'importe lequel de ses labels.

Les labels (les noms) supportent une structuration arborescente, au moyen de séparateurs, à l'image de ce qui existe dans les systèmes de fichier des ordinateurs. Par exemple, il est possible de labéliser un module : */unNom/unAutreNom(2)/unTroisieme*. Pour faire face au très grand nombre de modules, les labels supportent en outre un mécanisme de gestion des index entiers incorporés dans les noms, permettant qu'un grand nombre de labels qui ne diffèrent que d'un numéro soient stockés et retrouvés de façon efficace.

Un mécanisme d'expressions régulières, dénommé Expression de Sélection de Labels, ou en anglais *Label Picker Expressions, LPE*, permet ensuite à tout instant de désigner des listes de labels – et, partant, de désigner les modules qu'ils référencent – au moyen d'une syntaxe concise, qui tire partie de la structuration arborescente des noms et du mécanisme de gestion des entiers dans les noms. A titre d'exemples : */*unModule(22..33)* sélectionnerait tous les labels (donc, par raccourcis, « tous les modules ») qui, au deuxième niveau de l'arbre des labels, comprennent une chaîne de caractère comprise entre *unModule(22)* et *unModule(33)* au sens de l'ordre lexicographique usuel ; et *MAT:/unNom/>>* (« MAT » étant dans cette expression un *filtre*) sélectionnerait tous les labels référençant un module de type <MAT> et qui commencent par */unNom*. Toutes les commandes du langage PNSL acceptent de telles expressions et permettent donc de travailler sur des sous-ensembles de labels – donc de modules.

Avec le système de labellisation, le réseau physique en cours de conception reste lui-même *sans structure*, comme il doit l'être. Ce sont les labels qui sont structurés. Cette indirection permet qu'un nombre quelconque de tels « noms structurés » coexistent pour n'importe quel module, pour porter toute signification utile à un moment quelconque du processus de modélisation et pour permettre tout type d'action sur des expressions de sélection de label (donc de modules) quelconques. Ainsi, l'utilisateur est-il d'une part à même de construire plusieurs organisations

de son réseau, au gré de ses besoins, organisations qui n'ont pas nécessité de suivre une structure arborescente unique. D'autre part, ces mêmes organisations ne s'imposent pas à lui, puisque le réseau lui-même reste non structuré.

4.6 Vers une interface multimodale graphique/textuelle pour l'activité de modélisation

Dans les chapitres 2 et 3 consacrés respectivement à GENESIS et à MIMESIS, plusieurs principes et éléments d'interface graphique interactive pour la modélisation avec les réseaux physiques ont été introduits, dont des espaces fondés sur la « manipulation directe » du réseau en cours de construction. L'intérêt de ce type de représentations manipulables pour certaines tâches de modélisation a été discuté. A l'inverse, en introduisant dans les paragraphes précédents le langage PNSL et le système de labellisation, nous avons avancé l'idée que la puissance d'abstraction permise par un langage de programmation est souhaitable pour la conception de certains types de réseaux physiques ou pour certaines tâches de modélisation.

Ces deux modalités d'interaction²⁷ sont complémentaires dans le contexte des réseaux physique. Chacune correspond à accès au réseau et au processus de sa construction qui lui est propre. Il ne s'agit donc pas de décider si la manipulation directe est dans notre contexte une métaphore d'interaction plus appropriée que la métaphore conversationnelle par langage, ou l'inverse, mais d'étudier *quand* et *comment* l'utilisateur doit pouvoir recourir à l'une ou à l'autre. Ainsi, la modélisation avec les réseaux physiques appelle, pour l'utilisateur, une coopération entre modalité graphique et modalité textuelle. Ce constat nous a conduit à proposer que les deux modalités d'interaction puissent non seulement coexister dans les environnements de modélisation, mais encore être mises à profit de façon flexible par l'utilisateur, en fonction de ses besoins et de ses phases du travail. Nous nous intéressons donc désormais aux mécanismes que nous avons proposés en ce sens.

Cette étude a été conduite dans le cadre des travaux de thèse d'Ali Allaoui [Allaoui.10], sous la direction d'Annie Luciani, dans le contexte de la modélisation pour l'image animée et du projet MIMESIS. Nous faisons ci-dessous état de ses résultats, tels qu'ils apparaissent dans le mémoire de thèse²⁸.

Notre étude s'inscrit dans la thématique des interfaces multimodales²⁹, objet par ailleurs d'un foisonnement certain dans le domaine de l'interaction personne-système. Elle nous a mené à proposer de nouveaux modes de coopération et de complémentarité graphique/textuelle et à de nouvelles manières d'organiser, dans le processus de l'utilisateur, la collaboration de ces modalités d'interaction.

Rappelons, pour commencer, qu'une différence essentielle entre ces deux modalités tient au fait que l'une s'appuie sur le principe d'une modification d'état, alors que l'autre s'appuie sur la description d'un processus. Cette différence signe l'un de leurs intérêts respectifs mais constitue aussi un verrou pour leur collaboration effective au cœur de l'activité de modélisation. La modalité graphique est en effet caractérisée par l'action directe, incrémentale, sur l'objet d'intérêt (dans notre cas : sur le modèle), avec effet immédiat sur son état. Ce n'est pas la suite d'action en soit qui est signifiante, mais bien les états successifs de l'objet d'intérêt auxquels conduisent ces actions. La modalité langagière, à l'inverse, permet de travailler sur le processus de construction (ou de modification) des objets d'intérêt. Le script est de fait une représentation

²⁷ Il s'agit de la notion de « modalité d'interaction » telle qu'elle est définie dans le domaine de l'Interaction Personnes-Systèmes ; nous discutons au paragraphe 6.4.2 des diverses acceptions des notions de modalité et de multi-modalité dans le contexte des domaines auxquels émergent nos travaux.

²⁸ Signalons que certaines expressions utilisées dans ce paragraphe sont directement héritées de ce mémoire. Les guillemets, qui alourdiraient le propos, n'ont pas été utilisés ici.

²⁹ « Multimodale » au sens du domaine de l'Interaction Personnes-Systèmes.

de ce processus, tel que pensé et mis en œuvre par le modélisateur – par exemple au moyen de boucles ou de conditionnelles. Avant que de considérer le *résultat*, c'est d'abord dans la trace du *processus* que le script prend son intérêt.

L'état de l'art de la collaboration entre modalités d'interaction graphiques et textuelles fait apparaître deux principes, dont l'usage est aujourd'hui relativement courant :

- Le principe de la *macro*. Dans ce cas, le script est essentiellement un moyen d'appliquer des commandes modifiant l'état de l'objet d'intérêt – de la même manière que la manipulation directe. La macro n'a alors pas valeur de représentation d'un processus, mais d'action sur l'état. L'implantation de ce principe est aisée, puisque qu'il n'y a pas conflit lorsque l'une ou l'autre des modalités est employée. C'est ce principe qui est retenu dans la plupart des systèmes interactifs dotés d'un langage, au travers d'un « langage de macro ».
- Le principe du *choix exclusif*. Suivant ce principe, l'utilisateur choisit une fois pour toute, pour chacune des parties de l'objet d'intérêt global, de recourir soit à la modalité graphique soit à la modalité textuelle. Dans ce dernier cas, le texte est conservé et devient lui même « objet d'intérêt ». Il constitue une représentation à la fois de la partie qu'il génère et du processus de sa génération. Toutefois, on s'interdit que cette partie soit ultérieurement modifiable au moyen de l'interface, puisque les deux modalités sont exclusives l'une de l'autre.

Ces deux approches ont ceci de commun que les modalités sont juxtaposées ; on peut parler de collaboration *horizontale* entre modalités. Toutefois, aucune des deux approches ne permet une collaboration entre modalités qui garantirait de bénéficier librement des avantages essentiels de l'une et l'autre tout au long du travail.

Notre ambition a alors été de chercher à ce que la collaboration graphique/textuelle puisse à terme devenir un véritable atout pour maîtriser la complexité du processus de modélisation avec les réseaux physiques et, ce faisant, un levier pour l'augmentation de leurs possibilités créatives. Il s'agit d'abord de faire en sorte qu'à tout instant, pour toute tâche de modélisation, l'utilisateur puisse choisir la modalité qu'il juge la plus adaptée. Il s'agit plus généralement que l'utilisateur soit à même d'organiser les avantages de chacune et les relations qu'elles entretiennent.

Nous avons abordé cette question en travaillant sur le principe d'une réification des scripts dans l'interface. Conférer à un script le statut d'objet (au sens très général de l'informatique, par exemple « d'objet d'intérêt »), objet qui sera représenté et accessible dans l'interface, permet : premièrement que le script, et donc, avec lui, la partie du processus de modélisation qu'il représente, soient des éléments constitutifs du projet de modélisation (par exemple en vis-à-vis du réseau, de ses paramètres ou des labels) ; et, deuxièmement que les correspondances et relations entre les « objets scripts » et les autres éléments du projet soient maîtrisées par l'environnement - et donc puissent être maîtrisées par l'utilisateur.

En sus de ce principe de réification, nous proposons que l'environnement conserve la trace de chaque modification portée par chaque « objet script » sur le modèle : création ou suppression de modules, définition de propriétés, etc. La conservation de ce lien causal est en effet l'un des éléments qui nous permet d'organiser la complémentarité entre modalité langagière et modalité graphique et entre les deux représentations (de l'état et du processus de sa définition) auxquelles chacune correspond. Par exemple, il devient possible d'interdire toute modification, au moyen de l'interface, des éléments (modules, paramètres, labels...) créés ou modifiés par un script – de telle sorte qu'on garantisse l'identité entre les effets du script et l'état de ces éléments. Ou à l'inverse, si on autorise des modifications par modalité graphique, il devient possible d'informer l'utilisateur du fait que « l'objet script » ne correspond plus à l'état du projet, et pourquoi.

A Allaoui a alors proposé deux mécanismes pour la collaboration graphique/textuelle : la *capsule* et la *fonction*.

La *capsule* se situe du côté de la collaboration horizontale. Elle s'appuie sur la notion d'encapsulation, courante dans les IHM. Le principe en est qu'une partie de réseau est encapsulée dans un macro-module, dont les éléments (algorithme et points de communication) sont définis par un assemblage quelconque de modules <MAT> et <LIA> - pas nécessairement complet. Ce contenu est défini par un unique script. L'intérieur de la capsule est protégé contre toute modification. Lorsqu'on ouvre la capsule, si on agit au moyen de manipulations graphiques, celles-ci sont ajoutées sous forme de nouvelles commandes à la fin du script. Le script représente donc à tout instant correctement l'état interne de la capsule. La capsule définit également son *interface*, en particulier la liste des points de communication des modules physiques qu'il est possible de connecter à l'extérieur. Enfin, nous avons proposé une représentation iconique des capsules, qui fait apparaître cette interface et la rend manipulable graphiquement sur l'établi topologique.

La *fonction* se situe elle du côté ouvert de la collaboration graphique/textuel. Une *fonction* est un élément du projet, auquel est associé un script. Le script d'une fonction peut être quelconque et donc son exécution peut modifier l'état de n'importe quel éléments du modèle (création/suppression de modules, connections, paramètres, conditions initiales, labellisation...). A l'inverse des *macros*, la fonction est conservée avec le projet et associée à un ensemble d'informations quant à son effet sur l'état du modèle : lorsque la fonction est exécutée, la trace de ses effets est conservée. Grâce à ces informations, il devient d'abord possible de *défaire* les conséquences de la fonction lorsque l'utilisateur la ré-exécute, par exemple après en avoir modifié le script. De plus, il devient possible d'informer l'utilisateur quant au statut de validité de la fonction, eu égard à ses effets. Ainsi, bien que plus fragile que la capsule, la fonction constitue un mécanisme ouvert, flexible et qui garantit l'intégration des scripts au projet Elle apporte de la liberté à l'utilisateur, qui en contrepartie reste responsable de la cohérence entre ses scripts et l'état du système.

4.7 Anatomie de la suite logicielle pour la modélisation avec les réseaux physiques et nouvelles versions de GENESIS et MIMESIS

Au delà de la convergence des innovations apportées dans les versions précédentes de GENESIS et MIMESIS, et d'un important effort en ingénierie logiciel, le travail de refondation des environnements de modélisation/simulation physique, mené avec la perspective de la *Physics Networks Suit*, aura donc été l'occasion de recherches visant de nouvelles propositions quant aux concepts sous-tendant ce type de logiciels.

Ce travail s'est alors concrétisé par la réalisation de nombreux éléments logiciels génériques, multi-plateforme, inter-opérables entre eux et avec d'autres types de logiciels, totalisant plus de 350 000 lignes de code, 12 bibliothèques, plus de 1000 classes. Ces éléments sont à même de servir de base commune aux divers environnements de modélisation du groupe, sans préjuger des types de modèles qu'ils supportent et de leurs finalités : mouvement et image, son, création visuelle ou musicale, usages recherche ou création. Parmi ces éléments, citons :

- Un noyau logiciel de modélisation : principales structures de données et modalités d'accès à ces structures, optimisé pour les très grands nombres de modules et à la fois la manipulation individuelle de chaque module et la manipulation de groupes de modules.
- Un noyau logiciel de simulation acceptant tout type de modèle CORDIS-ANIMA, permettant le contrôle du simulateur et organisant l'ensemble des flux de données phénoménologiques autour de la bibliothèque de simulation CORDIS-ANIMA (enregistrement fichier, visualisation, écoute...).
- Des espaces graphiques proposant diverses représentations des modèles en cours de conception et permettant la manipulation directe de ces représentations, qui étendent

les propositions portées par les versions antérieures de GENESIS et MIMESIS (établi de conception de la topologie du réseau; fenêtre de manipulation de l'état initial du réseau...)

- Des bibliothèques de *widgets* dédiés, pour la manipulation des paramètres, des structures de données, des conditions initiales...
- Le langage de script PNSL, permettant de « programmer » l'activité de modélisation.
- Le système de labellisation, accessible aussi bien au sein du langage PNSL qu'au moyen des éléments d'interface
- Des processus innovant entre collaboration graphique et collaboration textuelle
- Plusieurs outils logiciels spécifiques (outil de conversion de formats de modèle et de données phénoménologiques, analyseurs de modèles, etc.)

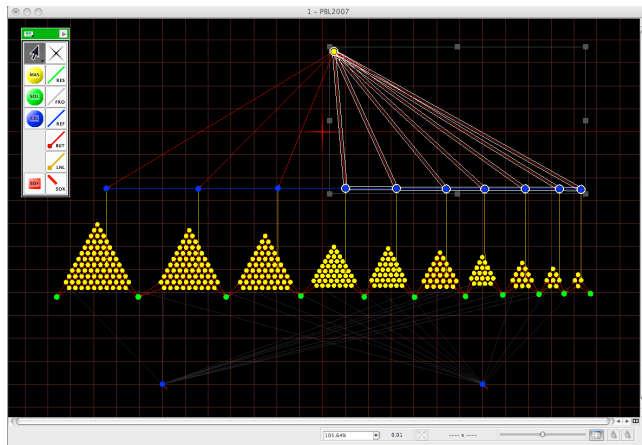


Figure 13 : GENESIS3, la nouvelle version multiplateforme de GENESIS, ici sur Macintosh

En 2009, ce travail s'est en outre concrétisé par une nouvelle version de GENESIS, premier environnement de la future suite logicielle pour la modélisation physique masses-interactions projetée [Castagné et al.09] [Castagné&Cadoz.09]. Cette nouvelle version, baptisée GENESIS³, est désormais disséminée par divers canaux, y compris celui d'une dissémination commerciale.

Une nouvelle version de MIMESIS est, enfin, actuellement en préparation – version Alpha 1, décembre 2013.

4.8 Vers un environnement multisensoriel - vers un art multisensoriel ?

Bien que récents, ces travaux apportent la démonstration de ce que, dans leurs fondamentaux, les processus de modélisation et de création avec les réseaux physiques destinés au son et la musique et les processus destinés à l'image et au mouvement, sont en de nombreux points comparables, et sont donc susceptibles d'être portés par des outils de même nature.

Ce résultat se concrétise dans la généricité des briques logicielles, conçues pour être utilisables dans des travaux et modèles destinés indifféremment à la synthèse de son ou la synthèse du mouvement visuel. Les éléments de la suite logicielle sont ainsi devenus des outils génériques pour la modélisation de tout réseau physique, indépendamment du type de dynamique que l'on souhaite obtenir, que ce soit au niveau des structures de données, du langage PNSL, des principes ergonomiques ou encore des éléments d'interface qui leur donnent corps. Ils sont en outre capables de supporter des modèles de fréquences, de dimensionnalités et d'échelles quelconques.

Le travail sur la suite *Physics Networks* contribue ainsi à l'affirmation de la portée générique du formalisme des réseaux physiques pour la modélisation et la simulation de tout phénomène dynamique à l'échelle de la sensori-motricité humaine. Ce travail porte en outre la perspective de pouvoir faire cohabiter, en interaction physique cohérente, dans un seul et même modèle des parties d'échelles, de dimensions et de fréquence de simulation différentes, l'ensemble adressant les diverses modalités sensori-motrices : geste, image, son. Ainsi se dessine pour l'avenir un

modeleur pour la modélisation de phénomènes dynamiques visibles, sonores, tactiles ou manipulables, qui intégrerait le multi-échelle, le multi-fréquence, la multi-dimensionalité et la multi-sensorialité.

Il s'agit à nos yeux d'une perspective essentielle dans nos domaines scientifiques. La possibilité d'adresser les problématiques de l'animation, du son, du geste et de la musique dans un environnement unique, et plus encore avec un formalisme unique et un type de savoir-faire et une manière de penser unifiés, est aujourd'hui encore tout simplement inexistante. Nous pouvons espérer que se préfigurent ici la découverte et l'expérimentation de pratiques artistiques résolument nouvelles – et, nous le pensons, les bases d'un nouvel « art des objets virtuels *multisensoriels* ».

5 Etudes avec et pour le formalisme des réseaux physiques

Le cœur de ma contribution au programme du groupe est essentiellement axé sur des recherches à visée technologique amenant, d'ailleurs, aussi bien à des réalisations techniques et des outils qu'à des travaux de positionnement théorique sur ces recherches et outils. Cependant ce parcours m'a amené, en plusieurs reprises, à participer à des travaux de modélisation et d'expérimentation mettant en œuvre le formalisme CORDIS-ANIMA et/ou visant à le faire évoluer.

5.1 Travaux de modélisation et d'expérimentation

Responsable :	C Cadoz et A Luciani
Temporalité de mon implication :	1996-2013
Publications :	[Hegeias et al.03_#] [Luciani et al.03_#] [Guilbaud et al.03_#] [Berdahl et al.12_#] [Castagné.96_#] [Castagné&Cadoz.98_#] [Castagné&Cadoz.00_#] [Leonard et al.13c_#] [Christou et al.11a_#] [Christou et al.11b_#]

Pour certains de ces travaux, je suis intervenu essentiellement par le biais des technologies qui les ont supportés, soit qu'elles aient utilisé ou validé certains des logiciels réalisés auxquels j'ai contribué, soit qu'elles aient révélé la nécessité de nouveaux développements. Ce fut le cas en particulier des travaux de modélisation en image et en animation [Hegeias et al.03_#] [Luciani et al.03_#] [Guilbaud et al.03_#].

Dans d'autres cas, par exemple [Berdahl et al.12_#] [Castagné.96_#] [Castagné&Cadoz.98_#] [Castagné&Cadoz.00_#] [Christou et al.11a_#] [Christou et al.11b_#], ces travaux ont visé à l'étude d'un certain nombre de questions se posant aux limites du formalisme CORDIS-ANIMA ou de ses usages les plus courants, produisant ainsi une connaissance susceptible de nourrir de futures évolutions du cadre formel.

Nous prendrons l'exemple de [Castagné.96_#] [Castagné&Cadoz.98_#] [Castagné&Cadoz.00_#], travaux dans lesquels nous produisons une analyse de l'intérêt des modèles CORDIS-ANIMA multidimensionnels en synthèse de sons. A ce jour, l'essentiel des modèles sonores réalisés avec les réseaux physiques – et en particulier tous ceux qui sont réalisés dans GENESIS – ont recours à la version unidimensionnelle du formalisme CORDIS-ANIMA : l'espace des calculs physiques est réduit à une unique dimension – ou, si l'on préfère, les signaux de force et de position échangés entre modules via leurs points de communication sont scalaires.

Ce choix a été mûrement pesé. Il est tout d'abord conforme au fait qu'en première approche l'essentiel des phénomènes dynamiques producteurs de son peuvent s'analyser suivant une dimension unique. C'est, par exemple, le cas des cordes vibrantes, des tubes acoustiques, des plaques et des peaux – dont les équations d'onde les plus simples ne considèrent qu'une dimension pour les mouvements. Il se justifie en outre par le fait que, comme le montre la variété de modèles réalisés à ce jour, la palette sonore qu'il est possible d'obtenir avec des modèles unidimensionnels est tout à fait intéressante. Enfin, ce choix présente un intérêt majeur : il facilite considérablement le processus de modélisation, puisque le modélisateur n'est pas en nécessité de se confronter aux difficultés posées par la gestion de l'espace.

Dans [Castagné.96_#] [Castagné&Cadoz.98_#] [Castagné&Cadoz.00_#], nous nous sommes interrogés sur l'intérêt des modèles multidimensionnels pour le son, en réalisant l'étude expérimentale et théorique d'un modèle d'usage très courant de corde vibrante : le *filament*,

dans lequel des <MAT> sont reliés deux par deux en une ligne par des visco-élasticités, les deux viscoélasticités à l'extrémité étant elle connectées à des points fixes.

Dans un premier temps, nous produisons une exploration systématique, au moyen d'un plan d'expériences, des comportements d'un tel filament bidimensionnel sous tension. Nous montrons que, en dehors des cas les plus simples, ce modèle adopte certains comportements non linéaires, dus à la spatialité, qui ont un effet sonore important. Les deux principaux comportements non linéaires sont :

- 1) la présence d'ondes longitudinales et leur interaction avec les ondes transversales couramment considérées dans l'équation bien connue de propagation des cordes vibrantes ;
- 2) un effet de tension non linéaire, dû au fait que la force de rappel augmente de façon non linéaire avec l'amplitude des déplacements transversaux des <MAT> du filament. Ce second effet est bien connu en acoustique : il est responsable de l'effet de « glissement » de la fondamentale vers sa valeur nominale, perceptible aux forts niveau d'excitation, en particulier pour les cordes graves – par exemple de piano ou de contrebasse.

Sur l'ensemble des expériences, nous montrons, de façon subjective, que ces deux comportements ont un effet pertinent sur la perception. Le second, par exemple, renforce la sensation d'un niveau d'excitation important. Afin de permettre un contrôle par le modélisateur, nous montrons que l'importance relative de ces effets dans le son dépend de certaines plages de valeurs paramétriques et des conditions de l'excitation du modèle (niveau, direction...) et nous mettons en évidence les principales tendances.

Dans un deuxième temps, nous produisons une analyse du fonctionnement d'un tel filament bidimensionnel sous tension. Au moyen d'un développement limité des forces de rappel dues à la tension, et sous l'hypothèse de petits déplacements transversaux, nous montrons tout d'abord qu'un filament bidimensionnel est, au premier ordre, équivalent à un filament *unidimensionnel* dans lequel les raideurs des ressorts unidimensionnels sont proportionnelles à la force longitudinale appliquée à au filament 2D pour le mettre sous tension. Ce résultat est, bien sûr, conforme à l'équation d'onde simple des cordes vibrantes. Au deuxième ordre de ce développement limité, nous montrons qu'un terme de raideur non linéaire apparaît, dans lequel la composante de la force de rappel varie comme le *cube* de la distance des <MAT> connectés suivant l'axe transversal à la corde.

Sur la base de ce dernier résultat, nous proposons d'introduire dans la version unidimensionnelle du formalisme un nouveau type de module élastique, non linéaire, dit « module d'élasticité en X^3 ». Nous réalisons ensuite une nouvelle série d'expérimentation, cette fois ci avec un filament unidimensionnel équipé de ce nouveau module, et démontrons que, pour une large plage de valeurs de paramètres, il permet d'obtenir dans le son le second effet non linéaire détecté dans les filaments bidimensionnels ;

Signalons qu'une version spécifique de GENESIS a ensuite été réalisée avec ce nouveau module. Plus généralement, ce type d'étude pourra à l'avenir nourrir notre réflexion quant aux évolutions de fond du formalisme des réseaux physiques ou des environnements qui l'utilisent, tels que GENESIS et MIMESIS. A terme, en effet, il pourrait s'agir par exemple que GENESIS permette de mettre en œuvre des modèles multidimensionnels (Mais dans quelles conditions ? A quelles fins ? Avec quelles ergonomies et quelles articulations avec les processus de création désormais éprouvés utilisant la version unidimensionnelle du formalisme ?). Il s'agirait également de clarifier le cadre formel qui, au sein de CORDIS-ANIMA, permettrait de faire collaborer physiquement dans un seul et même modèle des parties de dimensionnalités différentes.

5.2 Etude en vue d'une évolution du formalisme CORDIS-ANIMA: la question des changements d'état discontinus

Responsable :	A Luciani
Chercheurs impliqués	ICA-ACROE : A Luciani, Saman Kalantari, N Castagné, C. Cadoz XLIM : P Meseure, X Skapin
Temporalité de mon implication :	depuis 2010.
Contexte des travaux	Maître de Conférences. Travaux soutenus par le projet ANR DYNAMé, sous la responsabilité d'A Luciani.
Co-encadrement :	thèse de Saman Kalantari (2010-en cours), dirigée par A Luciani et C Cadoz ; co-encadrant depuis 2011.
Publications :	[Kalantari et al.14b_#]

Deux moments clés dans la mise au point du formalisme CORDIS-ANIMA ont été, en premier lieu, la version élaborée par C. Cadoz en 1981 [Cadoz.79] suivie par son extension, par A Luciani, aux modèles tridimensionnels pour l'image [Luciani.85] ; puis, en second lieu, la version élaborée par l'équipe en 1991 (Cadoz, Florens, Luciani, Raoult, [Cadoz et al.93] [Luciani et al.91]). Cette dernière version du formalisme est au cœur des moteurs de simulation (moteurs pour la simulation sans interaction temps réel en 1992 et moteurs temps réel de 1991 et de 2000) et des environnements de modélisation (GENESIS, MIMESIS, et la suite logicielle pour les réseaux physiques – de 1995 à nos jours). Elle a également fondé, durant ces 20 dernières années, les travaux de modélisation en recherche et en création.

A partir de 2010, partant de la version de 1991 de CORDIS-ANIMA [Cadoz et al.93] dans laquelle Claude Cadoz avait défini un cadre formel général pour la représentation des changements paramétriques et des changements de structure dans les réseaux CORDIS, Annie Luciani a initialisé et dirigé une nouvelle phase dans l'étude des changements de structure discontinus, dans le contexte de la création du mouvement visuel et de l'image animée. Ces travaux sont centrés sur la nécessité de pouvoir modéliser des changements d'état discontinus, telles que les séparations et les recombinaisons au sein du réseau physique. Cette étude fait en particulier l'objet des travaux de thèse de Saman Kalantari³⁰, financé par le projet ANR DYNAMé.

Résumons ici les principales idées de l'étude, portées par A Luciani.

Dans la version de CORDIS-ANIMA de 1991, la manière nominale d'aborder les changements d'état est d'avoir recours à des interactions élastiques non linéaires entre masses, décrites par des courbes distance/force définies point par point, de telle sorte que l'algorithme calcule une force de nature cohésive ou répulsive en fonction de la distance relative des deux masses connectées.

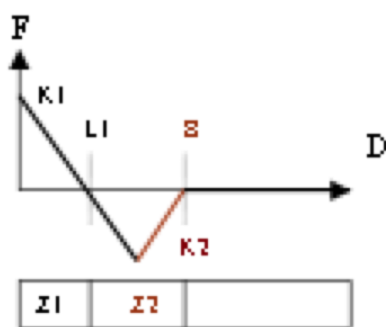


Figure 14, ci contre : courbe à 3 segments du module d'interaction élastique non-linéaire COH3 de MIMESIS, qui modélise un phénomène cohésif : si les deux masses connectées sont proches (1^{er} segment), elles sont en situation d'interaction élastique linéaire ; lorsqu'elles s'éloignent, la force élastique cohésive diminue, jusqu'à devenir nulle ; les deux masses sont alors libres et le restent tant qu'elles ne se rapprochent pas. Au delà de cet exemple, plusieurs types d'interaction non linéaire ont été par le passé proposés, expérimentés et, pour certaines, incorporées dans le modèleur MIMESIS [Evrard et al.06a_#].

Cette approche a fondé jusqu'à ce jour la plupart des travaux de l'équipe « technologies pour les arts visuels » en modélisation de phénomènes dynamiques dans lesquels un changement d'état complexe se produit, comme un phénomène d'avalanche, de fluide et de foule. Les résultats

³⁰ Saman Kalantari termine actuellement la troisième année de son doctorat. Thèse dirigée par A Luciani et C Cadoz. J'en suis co-encadrant depuis la deuxième année.

obtenus sont remarquables dans leur qualité et leur diversité. Toutefois, cette approche de la modélisation des modifications d'état amène deux remarques, formulées ainsi par A Luciani dans [RapAct.12_#] :

1. Les phénomènes qui produisent l'évolution dans nature de la force d'interaction sont nécessairement locaux : ils proviennent uniquement de l'observation (de la mesure), via l'algorithme du module d'interaction, de la position des deux masses connectées. Formellement, le principe ne permet pas qu'un changement d'état trouve son origine dans d'autres phénomènes, soit qu'ils soient d'une autre nature (par exemple un seuil de force de cisaillement) soit qu'ils se situent ailleurs dans le modèle.
2. Le fait que la modification d'état soit portée par la fonction d'interaction, implique que le changement se situe « quelque part entre les points physiques » ; cela rend l'opération de visualisation de la fracture (« d'habillage visuel ») délicate, en ce sens que le lieu exact de la fracture est sous déterminé. Il devient nécessaire soit de supprimer visuellement les éléments de matière reliant les points physiques qui étaient en interaction (mais alors il y a « disparition » de « matière visuelle »..), soit de créer de nouveaux points quelque part le long de l'interaction (mais où ? et avec quelle loi d'animation ?)

Ces deux remarques illustrent une limitation fondamentale dans les possibilités actuelles, certes déjà très grandes par ailleurs, de modélisation et de simulation, des phénomènes dynamiques visuels avec changement d'état au moyen des réseaux physiques.

Pour aller plus loin, le groupe de travail a alors conduit, sous la direction d'A. Luciani, une étude visant à ce que l'éclatement puisse se produire *au niveau des masses ponctuelles tout en restant valide du point de vue de la conformité physique des mécanismes en jeu*. L'idée générale, introduite et portée par A Luciani, est que deux points matériels, parfaitement confondus dans l'état cohésif, se séparent de façon physiquement valide (par exemple, dans le cas usuel, avec conservation de la masse) lorsqu'une condition de rupture détectée dans le réseau intervient. Il y a alors *visuellement* « rupture du point matériel » en deux (ou plusieurs) points matériels, ce sans qu'il y ait modification ni de la nature de la structure du réseau, ni de sa complexité algorithmique.

Une nouvelle fonctionnalité a été introduite dans CORDIS-ANIMA sous le vocable « MAT-éclatables ». Cette fonctionnalité consiste en ce qu'un ensemble de masses, situées dans leur état initial au même lieu de l'espace de simulation, soient soumises chacune aux mêmes efforts et partagent donc la même « histoire » jusqu'à ce que, sous l'effet d'une condition d'éclatement détectée dans le réseau, et suivant des lois spécifiées dans un automate de changement d'état, certaines d'entre se libèrent des autres et acquièrent un comportement qui leur devient propre.

L'introduction de cette nouvelle fonctionnalité a soulevé quatre difficultés :

1. le fait de garantir la cohérence physique de l'éclatement, c'est à dire en particulier les lois de conservation (quantité de mouvement, énergie).
2. la nécessité d'assurer la qualité formelle du mécanisme, c'est à dire de faire en sorte que son introduction au sein du formalisme ne nuise pas aux propriétés de CORDIS-ANIMA que sont notamment la modularité et le pouvoir expressif ;
3. la mise à jour de principes utilisables pour le travail de modélisation incorporant les « MAT-conditionnelles », notamment en ce qui concerne la définition de l'automate d'état qui va régir les éclatements successifs, en ayant en perspective l'incorporation de ces principes aux modeleurs du groupe et leur prise en main par les utilisateurs ;
4. la nécessité de parvenir à une expression algorithmique optimale en cours de simulation au regard du mécanisme en question, dans la perspective d'un calcul « temps réel » contraint.

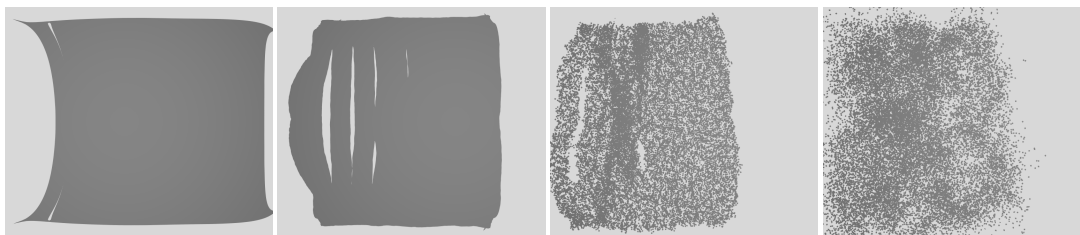


Figure 15 : Exemple d'une surface avec déchirures et fragmentations réalisée par modélisation physique CORDIS-ANIMA à partir des nouvelles fonctionnalités de modification structurelle par « MAT-éclatables ». S Kalantari et A. Luciani. D'après [Kalantari et al.14_#].

Mon positionnement dans cette étude a été triple. Elle m'a tout d'abord permis de renforcer ma connaissance de la problématique de la modélisation et de la simulation physiques dans le domaine de l'animation en informatique graphique. Au delà du contexte scientifique et artistique de l'image animée, elle a constitué pour moi une première occasion de me confronter au processus de formalisation de CORDIS-ANIMA. A ce titre, je me suis en particulier intéressé à l'impact que les fonctionnalités nouvelles, envisagées dans le cadre de cette étude, pourraient avoir d'une part sur l'architecture logicielle des moteurs de simulation notamment en matière de structure de données et squelette de calcul, d'autre part sur les fonctionnalités des environnement de modélisation. Enfin, j'ai pu investir dans cette étude mes connaissances et préoccupations relatives à l'activité de modélisation avec CORDIS-ANIMA et aux technologies logicielles qui la supportent, avec en perspective l'insertion future de ces nouvelles fonctionnalités dans ces outils.

Ce travail a fait l'objet de la soutenance de thèse de S Kalantari en mai 2014 et d'une publication [Kalantari et al.14_#]. Il nourrit d'ores et déjà les travaux en cours visant une nouvelle étape dans la formalisation des principes des réseaux physiques, sur lesquels nous reviendrons dans le chapitre conclusif.

6 Contributions autour de la notion d'interaction instrumentale

J'ai participé, à partir des années 2004 - 2005, à des travaux théoriques, bibliographiques et expérimentaux relatifs à la notion de simulation instrumentale multisensorielle, notion fondatrice du programme de recherche du groupe. Cette partie est dédiée à ces études. Nous y retrouvons donc le cheminement évoqué dans le préambule de ce mémoire. Par ailleurs, ces travaux ont été pour moi l'occasion de poser quelques bases pour les perspectives de recherche que nous développerons en conclusion.

6.1 Plateformes et environnements logiciels pour la simulation temps réel synchrone

Responsable	Jean-Loup Florens
Chercheurs impliqués	JL Florens, N Castagné, A Luciani
Temporalité de mon implication	: 2005-2008, 2010-...
Contexte des travaux	Ingénieur de Recherche, puis Maître de Conférences. Projet interne au groupe.
Publications :	[Castagné et al.05_#] [Florens et al.05_#] [Marchi et al.10_#] [Florens et al.04_#] [Luciani et al.05_#] [Castagné et al.04_#]
Co-encadrements :	Participation à certains travaux de thèse de D Couroussé. Ingénieurs et techniciens.

J'ai commencé à partir de 2005 à participer à certains travaux technologiques dans le contexte des plateformes de simulation multisensorielle.

6.1.1. Des contraintes parmi les plus hauts niveaux d'exigence en matière de calcul temps réel synchrone haute performance

Dans ce contexte encore en devenir, rappelons que nous cherchons à spécifier et à mettre en œuvre une *plateforme numérique de simulation instrumentale*. Cette plateforme est dotée de transducteurs gestuels à retour d'effort et de transducteurs sonores et visuels. Les retours visuels et audio et le retour de force sont élaborés, à partir de l'entrée de position captée au niveau du transducteur haptique, par le calcul en *temps réel synchrone* d'un unique modèle physique, formulé à l'aide de CORDIS-ANIMA. L'ensemble simule le comportement d'un objet physique (réel ou inventé) avec lequel l'opérateur interagit de manière multisensorielle. Le couplage gestuel permet la simulation de la fonction ergotique de l'interaction gestuelle.

L'alliance de l'exigence « temps réel dur synchrone » et de la complexité engendrée par la recherche d'une grande puissance de calcul, le tout pouvant être associé à la possibilité de traitements périphériques (en particulier pour les sorties images), place la simulation instrumentale parmi les contextes applicatifs présentant les plus hauts niveaux d'exigence en matière de *calcul temps réel synchrone haute performance*. Ainsi, notre contexte applicatif nous place *de facto* aux limites de l'état de l'art dans le domaine de l'informatique temps-réel. Précisons brièvement les capacités recherchées pour ces plateformes, en commençant par situer quelques éléments quantitatifs quant aux objectifs de performance minimale en matière de calcul synchrone.

Les parties acoustiques du modèle sont calculées à fréquence d'échantillonnage sonore, typiquement 44,1 KHz. Les parties mécaniques, non acoustiques, du modèle (on parlera de « partie gestuelle » ou « partie image ») sont calculées a minima à une fréquence de 1000 Hz, conformément aux résultats établis de longue date par l'équipe image du groupe. Le débit d'information en provenance ou à destination du périphérique haptique doit également être suffisant. Plus encore, la *latence* entre entrées et sorties gestuelles ne doit pas excéder un certain seuil temporel, sous peine de rompre la boucle tactilo-proprio-kynesthésiques sensori-motrice et donc de rompre le couplage homme-instrument qui se joue au niveau du transducteur gestuel. Le minimum à considérer retenu pour la fréquence des communications avec le périphérique est également de l'ordre de quelques milliers de Hertz. Ainsi, compte tenu du principe de *T_Simulation* synchrone introduit dans la première partie de ce mémoire, il apparaît que la latence entre entrée gestuelle et sortie gestuelle, sonore et visuelle doit être inférieure à 1ms – fenêtre temporelle durant laquelle doivent s'effectuer la totalité des calculs du modèle physique, mais aussi toutes les communications en provenance ou à destination des transducteurs [Luciani et al.05_#]³¹.

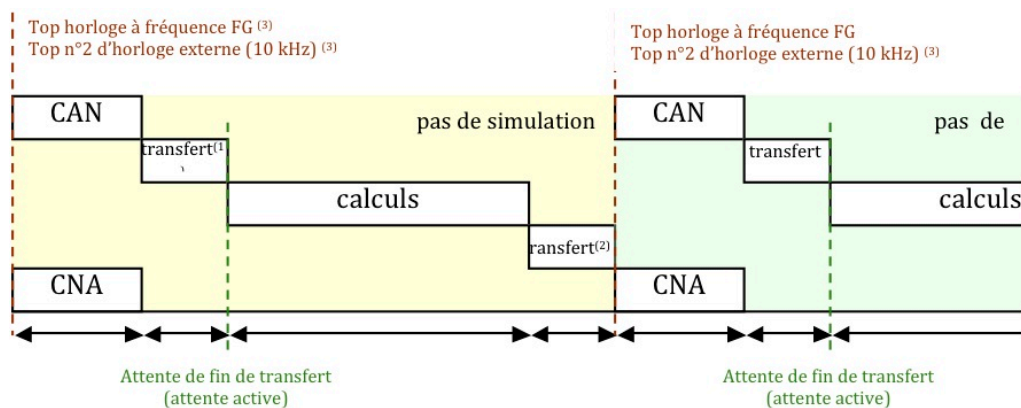


Figure 16 : squelette temps-réel synchrone mono-fréquence

- (1) Il s'agit du temps de transfert des données « position » de la carte CAN, après conversion jusque dans la mémoire du processus utilisateur.
- (2) Il s'agit du temps de transfert des données « force » du processus utilisateur dans la carte CNA (avant conversion)
- (3) Si possible, délai sans jitter (e.g. sur horloge externe) réglable entre les CAN et les CNA.

Ces éléments quantitatifs s'entendent comme des *minima*. Les seuils de réactivité en deçà duquel il devient impossible de qualifier « d'instrumentale » une situation multisensorielle interactive (ou en deçà duquel il devient impossible de stimuler la fonction *ergotique* du geste instrumental) est encore objet d'étude. Incidemment, pour qu'une telle étude puisse être conduite avec sérieux, il est nécessaire de disposer d'une plateforme de simulation qui permette de travailler au plus haut niveau d'exigence, avec une qualité métrologique, quitte à dégrader sciemment ses performances. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'une machine de simulation permettant une situation « instrumentale » aux limites des performances qu'il est possible d'atteindre compte tenu de l'état de l'art technologique. Il s'agit là d'une démarche suffisamment originale, dans le domaine de l'haptique, pour être signalée.

³¹ Notons que d'autres contraintes jouent au niveau de la qualité des convertisseurs numérique/analogique et analogique/numérique utilisés pour adresser le système haptique, ainsi bien sûr qu'au niveau de l'électronique, de l'électronique de puissance et de l'électro-mécanique du système haptique lui même. Nous ne les évoquons pas davantage ici afin de nous concentrer sur les aspects informatiques

A titre d'exemple, certains travaux expérimentaux menés au sein du groupe vont jusqu'à cadencer à la fréquence sonore les parties gestuelles des modèles, dans un squelette de calcul mono-fréquence [Luciani et al.09]. La sortie de force devant être transmise au périphérique haptique au maximum une période d'échantillonnage après l'acquisition de l'entrée de position, on ne dispose alors que d'une fenêtre extrêmement courte de 22 μ s pour réaliser la totalité du calcul du modèle.

Ces objectifs considérés dans leur ensemble font peser sur l'ensemble de la plateforme de simulation, des contraintes en matière de latence des communications numériques et de rapidité des calculs qui, même plus de 30 ans après les premiers prototypes de plateforme de simulation réalisés par le groupe, restent critiques dans le monde du calcul temps réel. L'assemblage (voire la conception) d'une plateforme de simulation matérielle et logicielle adéquate et l'implantation d'un squelette de simulation synchrone fiable sont donc des verrous adressés au groupe, qui a, plusieurs fois dans son histoire, repoussé les limites en la matière et qui évolue *de facto* au plus haut niveau d'exigence dans les réalités virtuelles (domaines concernés : calcul temps réel, moteurs de simulation, haptique et réalités virtuelles...).

De plus, la situation se complique encore, dès lors qu'en plus du calcul synchrone faible latence, on vise l'obtention de situations instrumentales riches. Cet objectif nécessite d'une part une implantation générique et modulaire du « moteur de simulation » - or la mise en œuvre modulaire du moteur augmente nécessairement la complexité algorithmique des calculs - et d'autre part une complexité minimale des modèles. En effet, les contraintes de réactivité d'une part, de modularité et de puissance d'autre part sont par nature opposées ; les performances visées sur ces différents axes sont critiques au regard des technologies de calcul aujourd'hui disponibles.

6.1.2. Analyse, choix et mise en œuvre d'architectures matérielles pour la simulation

Face à ces contraintes, des architectures spécifiques, alliant matériel et logiciel et conduisant à un équilibre maîtrisé entre réactivité et puissance, sont requises. Au cours de son histoire, le groupe a été en la matière une force de proposition, renouvelant à chacune des évolutions de ses plateformes son inscription dans le domaine du calcul temps réel. C'est à certaines des dernières étapes que j'ai été associé.

Dans les années 1990, la plateforme de simulation temps réel du laboratoire s'organisait autour de serveurs *Silicon Graphics*, environnés de périphériques *ad hoc* et équipés du système d'exploitation IRIX – l'une des seules solutions alors dotées à la fois de capacités temps réel dur et de capacités de calcul puissant, incluant le calcul graphique. A partir de 2003, le groupe a mis en place, pour lui succéder, une nouvelle génération de plateformes de simulation transportables : la gamme ERGON_X. Ces plateformes, autour d'une carte co-processeur DSP, incluent des convertisseurs numériques/analogiques haute performance. Elles ont ainsi donné corps au concept d'*Haptic Processing Unit* [Courroussé.07] [Luciani et al.14c_#] qui prolonge, dans le domaine de l'haptique, celui de « carte son » ou de « co-processeur graphique GPU ». Sur cette carte DSP, les modèles peuvent être calculés de façon synchrone. Ils le sont parfois, dans des travaux expérimentaux, jusqu'à la fréquence sonore (44,1 kHz), fréquence de simulation inégalée à ce jour dans le domaine de l'haptique. Toutefois, la puissance limitée de ce type de calculateurs limite la complexité des modèles et nécessite une optimisation au cas par cas.

En 2004-2005, en prenant la suite de nombreux travaux antérieurs, nous avons conduit une campagne de prospection visant à renouveler la plateforme de simulation du laboratoire [Castagné et al.05] [Florens et al.05_#] avec pour objectif que le calcul de simulation puisse être effectué sur l'ordinateur hôte - et non plus uniquement sur la carte co-processeur – renouant ainsi avec la structure des anciennes plateformes de simulation élaborées sur stations *Silicon Graphics*.

Dans [Castagné et al.05], nous avons mis en évidence que les architectures usuelles des machines d'usage général (*general purpose*) ne peuvent en rien satisfaire les besoins de notre contexte applicatif. Nous montrons ensuite que les contraintes de la plateforme de simulation, en matière de calcul temps réel dur synchrone et de puissance, impactent à la fois : le matériel (conversion CAN/CNA), la propriété des co-processeurs, la synchronisation des cartes d'acquisition, l'architecture matérielle du calculateur, le bus de communication et la latence et les mécanismes des communications inter-processeurs, le nombre, la puissance et la vitesse des processeurs, ...) et finalement le logiciel (capacités temps réel du système d'exploitation, optimalité des calculs, gestion de la mémoire...). Nous établissons également que les performances attendues dans l'espace réactivité/puissance sont toujours tout à fait critiques dans le domaine du calcul temps réel.

Une campagne a alors permis d'étudier et de tester 10 configurations matérielles et 5 systèmes d'exploitation. L'étude s'est soldée par la sélection de plusieurs machines de l'assembleur *Concurrent Computer Corporation*, dotées du système d'exploitation temps réel propriétaire *RedHawk*. Ces plateformes ont ensuite été utilisées comme support de plusieurs travaux sur le temps réel synchrone lui-même ou le nécessitant (par exemple la Thèse de Julien Castet [Castet.10]).

Cette étude est en constant renouvellement depuis 2005. A titre d'exemple, nous avons lancé une veille technologique sur les systèmes d'exploitation temps réel libre à base Linux. Leurs capacités temps réelles étaient encore insuffisantes en 2005, mais en forte évolution. En 2013, nous avons entrepris une nouvelle campagne de test portant sur ces systèmes, ainsi d'ailleurs que sur une nouvelle génération de cartes co-processeur pour les entrées/sorties gestuelles. Les résultats de cette nouvelle étude ne sont pas encore disponibles.

6.1.3. Environnement logiciel pour les simulateurs ERGON_X

En 2005, j'ai co-encadré la mise en place d'éléments minimaux d'architecture logicielle pour la plateforme ERGON_X : séparation en plusieurs composants « drivers de la carte DSP », « librairie de simulation ERGON-Hôte », « librairie de simulation ERGON-DSP », « librairie de *widgets* génériques pour la plateforme », « applications », « formats de sauvegarde des modèles et paramètres ». J'ai, à cette occasion, participé à la conception d'un ensemble de démonstrations réalisées dans le cadre du NoE *Enactive Interfaces*. Chacune de ces démonstrations, appelées *emblematic scenari*, illustrent quelques-uns des principes essentiels des interfaces enactives : implication active du sujet, couplage fort des stimuli multisensoriels générés, etc.

Et depuis 2008, je suis impliqué dans la conception des environnements logiciels équipant le système de nano-manipulation, basé sur un système ERGON_X, installé sur la plateforme Nanomonde du CIME. Chacun de ces logiciels comporte une partie « simulation » d'une nanoscène (embarquée sur DSP) et une partie « interface graphique » sur la machine hôte. J'ai participé la mise en œuvre de l'ensemble des interfaces graphiques ainsi qu'au développement de certains modèles (logiciel embarqué). Le nano-manipulateur est désormais utilisé dans le cadre de TP dans plusieurs formations (niveau Licence, Master et Doctorat), dont le Master Nanotech international de Phelma. Le dispositif nano-manipulateur et les enseignements dont il a permis la mise en place ont donné lieu à publication. En 2010, le dispositif et l'article [Marchi et al.10_#] ont reçu le prix de l'innovation pédagogique de la conférence CETSIS, catégorie Ingénierie.

6.2 GENESIS Temps réel : vers un Modeleur-Simulateur pour la création Instrumentale

Responsables :	C Cadoz, N Castagné
Chercheurs impliqués :	J Leonard, C Cadoz, N Castagné, JL Florens, A Luciani.
Temporalité de mon implication :	depuis 2012
Contextes des travaux	Maître de Conférences.
Publications :	[Leonard et al.12_#] [Leonard et al.13a_#] [Leonard et al.13b_#] [Leonard et al.13c_#] [Leonard et al.13d_#] [Leonard et al.14 – à paraître _#]
Co-encadrements :	thèse de J Leonard (co-directeur), depuis 2012. Stage de M2 de J Leonard, 2012

L'activité GENESIS-Temps réel, qui s'est organisée en particulier autour du stage de M2 de James Leonard, que j'ai co-dirigé avec Claude Cadoz, a consisté en 2012 à réaliser une toute première connexion de l'environnement GENESIS sur les plateformes de simulation ERGON_X. Pour parvenir à ce résultat, plusieurs verrous ont dû être levés :

- Un simulateur modulaire CORDIS-ANIMA optimisé pour le co-processeur DSP de simulation des plateformes ERGON_X a été développé. Il accepte les descriptions génériques de tout modèle GENESIS. Ce simulateur est le résultat d'une campagne d'évaluations de plusieurs architectures logicielles qui nous a permis d'augmenter d'un facteur 10 la puissance de calcul sur la carte de simulation dédiée DSP.
- Une version dédiée de GENESIS a été réalisée pour que l'utilisateur puisse articuler les activités de modélisation, de calibration et de jeu en temps réel de façon fluide et conviviale.

Ces premiers résultats, publiés [Leonard et al.12_#] [Leonard et al.13a_#] [Leonard et al.13b_#] [Leonard et al.13c_#] [Leonard et al.13d_#] [Leonard et al.14_#], sont d'importance : pour la première fois au monde, des modèles musicaux conçus avec la convivialité offerte par un environnement tel que GENESIS ont pu être simulés en temps réel synchrone avec toutes les exigences du jeu instrumental.

Le projet GENESIS-Temps Réel a été une première marche vers un projet plus large, appelé Modeleur-Simulateur pour la Création Instrumentale Musicale (MSCI-M). Ce projet regroupe l'ensemble des équipes du groupe. Il est organiquement lié au doctorat de James Leonard, co-dirigé par Claude Cadoz et moi même. J'ai été chargé de sa coordination.

MSCI-M est organisé comme un projet de convergence : il se situe au point de convergence de travaux sur le formalisme CORDIS-ANIMA, sur les stations de simulation multisensorielle temps réel dur et sur les environnement de modélisation. *« Il a pour objet d'intégrer les fonctionnalités de modeleurs avancés pour la création et celles de la simulation temps réel et de l'interaction instrumentale à retour d'effort. Sans antériorité historique sur le plan international, cet assemblage permettra à la fois de concevoir des modèles d'instruments virtuels et d'en jouer dans une situation instrumentale intégrale. Il s'agit donc d'intégrer la totalité des savoir-faire et des composants nécessaires à la création instrumentale, en parvenant pour chacun d'eux, et pour leur ensemble, à un niveau de fonctionnalités, de qualité et d'utilisation qui satisfasse les exigences et nécessités propres à l'acte créatif, afin de faire entrer de plein pied, au delà du laboratoire, les concepts et technologies de l'instrumentalité du groupe ACROE-ICA dans les processus de la création. L'objectif est que l'utilisateur puisse concevoir ses propres modèles instrumentaux, maîtriser les conditions de leur jeu et articuler conception de l'instrument et jeu instrumental dans un processus de création complet. »* [RapAct.12_#].

Dans le prolongement de GENESIS-Temps Réel, la 1^{ère} année de thèse de James Leonard (2012-2013) a notamment permis :

- L'étude de la correspondance entre le monde mécanique gestuel et le monde calculé, de telle sorte que l'utilisateur ait une maîtrise précise de l'interaction physique entre les deux univers [leonard et al.13a et d].
- La mise en œuvre d'une campagne de modélisation, qui a permis l'obtention de nombreux modèles et a permis de mieux maîtriser le couplage au moyen du système haptique entre l'opérateur et le modèle. Le groupe porte en la matière une approche originale, dans laquelle les problèmes de stabilité très connus dans le domaine de l'haptique sont analysés et traités au moyen de modèles physiques [Leonard et al.13c].

Au delà de ces premiers résultats, le projet adresse plusieurs défis scientifiques, sur lesquels nous reviendrons dans le chapitre consacré aux perspectives.

6.3 Positionnements relatifs à la boucle geste/son en informatique musicale

Responsable :	C Cadoz
Chercheurs impliqués :	A Luciani, C Cadoz, JL Florens, N Castagné, D Couroussé, J Leonard.
Temporalité de mon implication :	depuis 2004 dans le domaine de l'informatique musicale. Progressivement depuis 2006 en haptique et réalité virtuelle.
Contextes des travaux	Ingénieur de Recherches puis Maître de Conférences.
Publications :	[Castagné et al.04_#] [Luciani et al.05_#] [Castagné&Lagarde.07_#] [VanNort&Castagné.07_#] [Castagné.07a_#] [Leonard et al.12_#] [Leonard et al.12_#] [Leonard et al.13a_#]
Co-encadrements :	thèse de J Leonard, depuis 2012.

En parallèle aux travaux de nature technologique ci-dessus évoqués, qui se déroulent autour des plateformes de simulation multisensorielle, j'ai participé à des études bibliographiques et théoriques relatives à la notion d'instrumentalité. L'une de ces études a visé à mieux cerner les attendus et implications de cette notion dans le contexte des instruments musicaux numériques, notamment au regard des tendances contemporaines de la recherche.

6.3.1. Du paradigme du contrôle/commande à celui de l'interaction instrumentale

Avec l'émergence de la synthèse en temps réel du signal sonore et avec la multiplication des transducteurs gestuels, l'informatique musicale s'est, depuis plus de 30 ans, progressivement intéressée, à l'identification des principes théoriques et des technologies qui doivent permettre de faire de l'ordinateur un « instrument de musique ».

De façon générale, on peut dire qu'il s'agit de construire les éléments et d'apporter les conditions qui, autour de l'ordinateur, permettront à un musicien d'avoir dans son jeu une expressivité véritable. Cette espérance est difficile à réaliser de façon satisfaisante, comme l'ont écrit Wanderley et Cadoz en 1999 :

« En désolidarisant cause et effet, l'incursion de l'électricité dans la lutherie a profondément modifié la nature du jeu des instruments de musique. Et bien qu'une prodigieuse diversification des moyens de production sonore en ait résulté, ce changement de nature n'a pas encore engendré de stratégies de contrôle permettant de développer la même subtilité et la même ampleur de jeu que celle qu'on trouve dans les instruments traditionnels » [Wanderley.99].

Les recherches sur ces problématiques sont extrêmement actives depuis les années 2000. Dans [Castagné et al.04_#], publié dans la communauté de l'haptique, [Castagné&Lagarde.07_#] [VanNort&Castagné.07_#] [Castagné.07a_#] [Luciani et al.05_#], nous produisons une analyse de nature bibliographique dont l'objet est de proposer un nouveau point de vue sur les axes originels du programme du groupe, formulé en vis-à-vis des tendances observables dans les

recherches récentes sur les nouvelles interfaces pour la création musicale³². Notre analyse touche au positionnement théorique des auteurs, aux technologies adressées et à l'expression des qualités recherchées dans la relation que le musicien entretient avec la machine lors du jeu.

Suivant M. Wanderley, nous considérons que les principes qui dominent aujourd'hui en recherche et qui, incidemment, structurent l'essentiel des machines numériques sonores récemment proposées, sont ceux du *contrôle de synthèse* et du *mapping* [Wanderley et al.04] [Wanderley.99] – analyse reprise dans [VanNort&Castagné.07_#]. Suivant ces principes, on considère d'un côté les signaux gestuels générés par une large panoplie de transducteurs gestuels (claviers, joysticks, capture de mouvement, surfaces de contrôle de toutes sortes...), et de l'autre, les nombreuses techniques de synthèse et traitement du signal sonore. Le but est alors de rechercher et de programmer les mécanismes permettant un *contrôle* par le geste de ces algorithmes sonores. Pour atteindre ce but, on rend explicite un *étage de mapping* ou de *contrôle temps-réel*, externe au processus de synthèse/traitement.

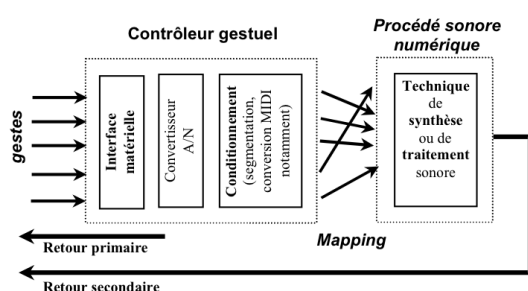


Figure 17 :
Constituants des « instruments virtuels »
d'après [Wanderley.99].

Toujours selon [Wanderley.99], un *instrument virtuel* conforme à ces principes peut être analysé en trois parties :

- 1 - les types de *gestes* permis par le système (son ergonomie matérielle) ;
- 2 - le *contrôleur gestuel*, ou transducteur gestuel, partie émergente de l'instrument
- 3 - et enfin le *lien instrumental* (ou « *mapping* »), qui projette les signaux gestuels sur certains paramètres de la technique de synthèse ou de traitement utilisée.

Ce lien instrumental est programmable. En particulier, il devient possible, par principe, d'expérimenter le contrôle de n'importe quelle dimension du signal sonore, pour peu qu'un paramètre adéquat soit offert par l'étage de synthèse sonore. De fait, en s'autorisant n'importe quel *mapping* de tout type de signal gestuel (continu ou évènementiel, de position, de pression, de force...) sur tout paramètre de synthèse et toute dimension du signal sonore (sonie, hauteur tonale, contenu spectral, formants, spatialisation, ...), le principe du contrôle de synthèse porte le projet de s'affranchir des contraintes imposées par la chaîne instrumentale mécano-acoustique [Wanderley&Battier.00] [Castagné.07a_#].

La problématique est alors d'identifier quels périphériques on pourra utiliser, quels paramètres des algorithmes de synthèse on devra contrôler, et surtout quelles lois de contrôle (quel *mapping*) il conviendra de mettre en œuvre pour que l'ensemble du système permette une certaine expressivité au musicien [Wanderley&Battier.00]. La loi de contrôle, ou « *mapping* » [Castagné&Lagarde.07_#] est en effet déterminante pour le comportement du système sonore temps réel ; elle reçoit aujourd'hui en recherche une attention particulière et a produit des résultats tout à fait remarquables.

Dans les articles rendant compte de notre analyse, nous avançons toutefois l'idée que les notions de contrôle de synthèse et de mapping portent en elles un biais fondamental qui rend difficile l'obtention d'une expressivité instrumentale véritable : celui de l'existence structurelle d'une frontière entre les gestes du musicien (ou leur « trace » dans le signal gestuel) et les paramètres du calcul numérique de synthèse. Notre raisonnement souligne le fait que l'architecture en deux sous parties, inhérente au mapping et au contrôle de synthèse, aboutit à ce que le geste du musicien soit réduit à *déclencher* un processus de calcul sonore, ou à modifier le cours d'un tel

³² Du nom de la conférence *New Interfaces for Musical Expression*, NIME, récemment créée en 2002.

processus, via le contrôle d'un choix de paramètres. Ces propriétés nous semblent ramener irrémédiablement le lien pouvant exister entre l'instrumentiste et le système sonore au niveau des paradigmes du *contrôle* et de la *commande*. Peu importe alors la bande passante du contrôle gestuel, le musicien est ainsi, par principe, ramené au niveau d'un « donneur d'ordre ».

Certes, la situation est alors *interactive*, mais il ne s'agit pas d'une interaction *instrumentale*. Cette dernière n'entre pas, en effet, dans le champ du paradigme du contrôle et de la commande. En situation d'interaction instrumentale, le musicien est physiquement couplé avec la matière sonore. Il est en équilibre entre plusieurs nuances ou modes de jeu, sur le fil entre deux résonances. Il doit alors faire preuve d'aptitudes importantes pour résoudre correctement la médiation délicate qu'impose la matérialité de l'instrument. Il est *mis en danger*, bien plus qu'avec un geste de contrôle, mais cette mise en danger est essentielle à l'expressivité musicale.

Ainsi, en permettant de « s'affranchir des contraintes de la mécanique », le contrôle de synthèse renonce en fait à une partie de notre potentiel expressif, en particulier celle que porte la fonction ergotique du geste instrumental.

Nous expliquons ensuite en quoi les travaux du groupe diffèrent, dans leurs fondations mêmes, des principes du contrôle de synthèse.

Ces travaux s'appuient, tout d'abord, sur l'analyse, emmenée par C Cadoz, de la situation instrumentale mécano-acoustique, analyse dont nous avons fait état dans la première partie du document. Cette analyse permet de cerner l'essence de la relation instrumentale par l'étude des fonctions du geste instrumental, par la caractérisation de la fonction ergotique du geste instrumental, par l'étude du couplage physique homme-instrument, ou encore par la tripartition des gestes instrumentaux. Elle s'est avérée un préalable à la conduite de plusieurs axes de recherche technologique : systèmes à retour d'effort, simulation physique, principes du calcul temps réel dur synchrone et moyens de modélisation de l'instrument et de son couplage multisensoriel geste-son-image avec l'instrumentiste. Dans ces travaux, il ne s'agit pas de réhabiliter la relation instrumentale dans une dynamique « passéiste », mais bien de permettre de retrouver ce qui en fait la quintessence, puis de pouvoir la sublimer par l'apport des possibilités nouvelles du numérique.

Quoi qu'il en soit les notions en jeu dans ces travaux (telles que : interaction instrumentale, couplage physique, ergotique, cohérence énergétique du geste au son...) et les technologies qui les adressent correspondent bien à une rupture de principe et à un possible changement de paradigme dans l'histoire des machines numériques sonores. Les résultats de recherche obtenus à ce jour permettent déjà d'en mesurer la portée.

6.3.2. A propos du positionnement des systèmes haptiques dans les systèmes numériques sonores interactifs

Le domaine de l'informatique musicale a manifesté d'assez longue date un intérêt pour les technologies haptiques, intérêt qui ne s'est jamais démenti. Toutefois, les objectifs poursuivis, les technologies produites et les positions scientifiques peuvent être très diverses. Réciproquement, les domaines de l'haptique et des réalités virtuelles s'intéressent progressivement à l'usage du canal sonore et aux questions spécifiques qu'il adresse.

Dans la continuité du repositionnement précédent, à partir de 2012, nous avons entrepris de renouveler l'étude de l'état de l'art relativement à la mise en œuvre de systèmes à retour d'effort pour la boucle geste-son dans les domaines de l'informatique musicale, de l'haptique et des réalités virtuelles. Ce travail, conduit notamment dans le cadre de la thèse de J. Leonard, est toujours en cours. Des résultats préliminaires de cette étude sont publiés dans [Leonard et al.12_#] [Leonard et al.12_#] [Leonard et al.13a_#].

Dans le contexte des travaux du groupe, on l'aura compris, la conception et la mise en œuvre d'un système haptique à retour d'effort sont envisagées comme une nécessité pour espérer simuler, autour des technologies numériques, un couplage homme-instrument simulé : « *They address a shift, from interactive instruments that implement the notion of control and command of signal based models, to the concept of gesture interaction with a digital artifact through an energetically coherent bidirectional link.* » [Castagné et al.04_#] [Castagné.07a_#].

Or, notre étude bibliographique montre que cette approche est encore rare dans les communautés concernées et ceci aussi bien en ce qui concerne les objectifs poursuivis avec le recours à un système haptique qu'en ce qui concerne la structure des systèmes mis en œuvre.

En matière de positionnement, deux tendances peuvent être notées.

Tout d'abord, en informatique musicale, il apparaît que les travaux ayant recours à des systèmes haptiques pour la boucle geste-son sont majoritairement positionnés dans la continuité directe des principes du contrôle de synthèse et du *mapping*. Le transducteur haptique est alors envisagé comme un simple « contrôleur gestuel » ayant ceci de particulier qu'il permet de faire remonter une information à la perception tactilo-kinesthésique. On espère par exemple qu'il permette un contrôle « plus fin » ou « plus précis » des processus de synthèse sonore que des contrôleurs sans retour d'information – mais non point qu'il permette un changement fondamental dans la manière d'envisager la notion d'instrument numérique. Il ne s'agit donc pas de simuler une situation instrumentale mécano-acoustique, mais bien essentiellement de disposer d'un nouveau canal pour remonter des informations au sujet. En particulier, le principe d'un *mapping* libre des signaux gestuels sur des dimensions quelconques du son demeure dans ce cas valide.

Dans cet ordre d'idée, une seconde tendance dans l'usage des systèmes haptiques consiste à « afficher » à la perception taktilo-kynesthésique de l'opérateur un certain nombre d'informations : forme de l'instrument, points attracteurs placés dans l'espace, etc. Considérant qu'un instrument sans retour haptique est difficile à jouer, on attend alors essentiellement de ce nouveau canal et du nouveau type d'information qu'ils assistent le musicien dans ses tâches de jeu musical en l'aidant à jouer « correctement » [Berdahl et al.09a]. A titre d'exemple, un archétype de cette tendance est pensons-nous trouvé dans [Moss&Cunitz.05]. Ce travail se propose d'équiper d'un bras haptique une version numérique du thérémin : le système haptique est utilisé pour *afficher* à la perception gestuelle les positions des notes « justes » de la gamme, au moyen de points attracteurs situés dans l'espace. Les auteurs concluent qu'un tel affichage haptique aide effectivement dans l'apprentissage et dans le jeu du thérémin. . Mais cette approche prend le contrepied direct de l'une des caractéristiques essentielles de cet instrument, qui, pensons-nous, en font l'un des intérêts fondamentaux : le fait que le thérémin se joue précisément sans aucun contact, au moyen d'une baguette radio.

Ce type de démarches se rattache aux principes du *haptic display*. Or, dans l'analyse des gestes instrumentaux proposée par C Cadoz, les principes du *haptic display* consistent essentiellement à stimuler la fonction épistémique du geste, mais ils ne se positionnent en rien relativement à la fonction ergotique du geste instrumental. Ils se distinguent ainsi fondamentalement de l'approche adoptée par le groupe ICA-ACROE, qui substitue résolument à la notion de « *haptic display* » celle de *couplage instrumental*.

En ce qui concerne enfin les recherches récentes en matière de technologies pour la boucle haptique-son, plusieurs tendances se dégagent également.

En réalités virtuelles, les systèmes faisant intervenir à la fois le son et l'haptique sont en général pauvres en matière de rendu sonore. Le plus souvent, les sons sont pris dans une banque pré-enregistrée et sont traités uniquement en matière de sonie et de localisation spatiale (spatialisation 3D). Dans tous ces cas, il est bien évident que le retour sonore est essentiellement

de nature événementielle (porteur d'une information quant à l'occurrence d'un événement dans la scène de réalité virtuelle), mais ne peut en aucun cas porter la signature de qualités fines de l'interaction gestuelle.

Plus généralement, on observe que, quels que soient les domaines scientifiques qui ont présidé à leur naissance, les systèmes réunissant son et haptique ont, une fois encore, en majorité une structure en deux étages, l'un consacré à l'haptique l'autre au son. Ils réunissent d'une part un « modèle haptique » et d'autre part un étage de calcul sonore. La formulation et le calcul de chacun de ces deux modèles sont alors effectués conformément aux usages des communautés dont ils sont hérités. On trouvera par exemple une modélisation « basée physique » et un calcul à relativement basse fréquence coté geste et, l'utilisation de techniques de synthèse du signal ou parfois de modèles physiques et un calcul à fréquence audio coté son. Le modèle mécanique *contrôle* alors le modèle sonore, tout comme cela est usuellement réalisé dans le contexte du « contrôle de synthèse » : il transmet à ce dernier des informations de diverses natures (déclenchement, flux de paramètres...), informations qui sont « mappées » sur des paramètres sonores. En outre, la communication entre les deux modèles est le plus souvent asynchrone et unidirectionnelle. Ainsi, il n'y a en général pas de rétroaction de l'étage sonore sur l'étage haptique, de sorte qu'on ne peut pas parler de couplage haptique-son.

Une telle structuration des systèmes haptique-son se distingue de façon claire des propositions technologiques du groupe en matière d'interaction instrumentale. Dans ces propositions, en effet, un modèle mécano - acoustique unique est calculé de façon synchrone et vise à garantir la cohérence du lien énergétique entre le geste de l'instrumentiste (du couplage gestuel) et le son produit.

Ces tendances dans les positionnements des auteurs et dans les réalisations technologiques sont encore aujourd'hui majoritaires. En revanche, il est intéressant de constater que, depuis les 5 à 10 dernières années, un nombre grandissant de travaux théoriques ou technologiques ont élaboré des liens avec l'approche portée depuis quelques 35 ans par le groupe ACROE-ICA. A titre d'exemple – mais la liste n'est pas limitative – on peut citer certaines analyses de l'importance du couplage haptique au regard des théories de la cognition incarnée (*embodied cognition*) [Gillespie&O'Modhain.11] [Pirhonen&Tuuri.08] et certaines réalisations techniques telles que celles de [Berdahl et al.09b] ou [Sinclair et al.10].

Quoi qu'il en soit, là encore, à la lumière de ces analyses bibliographiques, le concept d'interaction instrumentale, les notions de couplage geste-instrument simulé et d'ergotique apparaissent à la fois discriminants, en ce qu'ils permettent de partitionner efficacement les travaux relatifs à l'usage de systèmes haptiques, et toujours aussi novateurs et d'actualité.

6.3.3. Enjeux des applications sonores et musicales pour le domaine de l'haptique

Adresser ces diverses notions au moyen de technologies adéquates n'est pas chose aisée et les difficultés inhérentes aux implantations technologiques ne sont pas encore bien cernées.

Dans [Luciani et al.05_#], publié dans la communauté de l'haptique, nous nous efforçons de clarifier certaines des contraintes qu'elles font peser sur la technologie. Les fonctions épistémiques, sémiotiques et ergotiques du canal gestuel analysées par C Cadoz y sont illustrées par plusieurs exemples dans le cas de la boucle geste-son. Pour l'interaction ergotique, l'existence d'une cohérence énergétique entre le geste et le son produit est mise en évidence. Enfin, nous proposons plusieurs critères, dont certains quantitatifs, pour caractériser l'interaction geste-son ergotique avec des objets réels, ou qu'il convient de considérer pour envisager de simuler une interaction ergotique dans une situation médiatisée par l'ordinateur :

- la nécessité d'une interface à retour d'effort ;
- la nécessité de la modélisation et de la simulation physique (en lieu et place du principe de la synthèse du signal) ;

- la nécessité d'envisager le modèle physique comme un tout (opposée à l'idée d'un « modèle haptique » qui serait connecté par un moyen quelconque à un « modèle sonore »), qui seule permet d'envisager la maîtrise de la continuité énergétique du geste au son ;
- la bande passante, qui se doit d'être importante sur l'ensemble de la chaîne ;
- les plages dynamiques des variables physiques, en particulier des forces qu'il est nécessaire de considérer au niveau du transducteur haptique : de quelques milliN pour des interactions gestuelles de faible intensité, à 1000 N en pic pour des chocs durs ;
- les latences temporelles, nécessairement très contraintes pour parvenir à une maîtrise de la corrélation des variables duale force/vitesse nécessaire à la cohérence énergétique.

6.4 Travaux théoriques dans le cadre du réseau européen Enactive Interfaces

Responsable :	A Luciani, coordinatrice adjointe et coordinatrice scientifique du réseau <i>Enactive Interfaces</i>
Chercheurs impliqués :	ACROE-ICA A Luciani, C Cadoz, JL Florens, N Castagné, M Evrard. Partenaires du réseau Enactive Interfaces.
Contextes de mes travaux	De 2004 à 2007 : dans le cadre du projet européen <i>Enactive Interfaces</i>
Publications :	[Luciani&Cadoz.07_#] [Castagné.07a_#] [Castagné.07b_#] [Castagné.07c_#] [Castagné.07d_#] [Castagné.07e_#] [Castagné et al.07_#] [Castagné&Lagarde.07_#] [deGotzen et al.07_#] [VanNort&Castagné.07_#] [Varni&Castagné.07_#]

6.4.1. Contexte

De 2004 à 2007, le laboratoire a été très fortement impliqué dans le Réseau d'Excellence (NOE) européen '*Enactive Interfaces*', dans le cadre de l'appel d'offre « *Multimodal Interfaces* » du FP6 européen. Ce projet a regroupé sur quatre ans 24 organismes européens évoluant dans les domaines des Réalités Virtuelles, de l'Interaction Homme-Machine, de l'Informatique Graphique et Musicale, de l'Haptique, de la Psychophysique, des Sciences Cognitives et de la Philosophie. Le groupe ICA-ACROE était l'un des principaux partenaires du projet. A Luciani en assumait la coordination adjointe et la coordination scientifique.

Les travaux du projet étaient positionnés relativement au changement de paradigme actuellement à l'œuvre en sciences cognitives qui, de façon générale, tend à évoluer de la *théorie computationnelle* du fonctionnement cognitif vers les *théories cognitives de l'enaction*. Le paradigme computationnel traditionnel envisage la cognition comme un système, ou un ensemble de systèmes coopérant, dont la fonction essentielle est de *traiter et transmettre l'information* sensorielle, motrice et cognitive. A l'inverse, l'approche enactive des sciences cognitives, qui s'inscrit dans l'héritage des travaux du neurobiologiste F Varela, nie le principe d'un « traitement de l'information » par le système cognitif. Elle considère que la *cognition naît de l'interaction* de l'organisme avec l'environnement et s'intéresse au *couplages sensori-moteur* dynamiques entre ces deux entités. La perception et l'action sont ainsi intimement liées ; en particulier, il ne peut y avoir de perception sans action [Stewart.07] [Pasquinelli.07a].

Dans ce contexte, les objectifs technologiques du projet (tels que résumés dans [RapAct.04]) étaient « la conception d'une nouvelle catégorie de machine informatique adaptée à notre « intelligence sensori-motrice », appelée « machine sensible ». Cette « machine sensible » étant le troisième composant venant compléter la « machine intelligente » et la « machine communicante ». Dans cet objectif, les principaux thèmes et objectifs du projet ont concerné :

- L'incrémentation de la connaissance sur les boucles sensori-motrices : action / perception tactilo-proprio-kinesthésique, action / vision, action / audition, action / perception multisensorielle.

- *Le développement de nouveaux systèmes pour l'interaction sensori-motrice haptique et multisensorielle.*
- *La transformation des modèles et des nouvelles architectures informatiques, l'évolution des formats de codages de l'information permettant d'intégrer la dimension éactive.* »

En ce qui nous concerne, l'expérience au sein du réseau *Enactive Interfaces*, très collaborative et très riche tant sur le plan du débat d'idées que sur celui des réalisations, a nourri plusieurs des travaux dont il est question dans ce mémoire.

Enactive Interfaces fut pour moi une occasion unique de prendre conscience de plusieurs lignes de forces et de grandes catégories de positionnements théoriques qui encore aujourd'hui et sans doute pour les années à venir structurent profondément les domaines scientifiques et technologiques dans lesquels se situent nos travaux. Nous avons apporté une contribution à la clarification et la mise en perspective de certaines de ces *lignes de forces* au sein des travaux de plusieurs *workpackages*³³ ainsi qu'à l'occasion du travail sur l'ouvrage « *Enaction and Enactive Interfaces, an Handbook of Terms* »³⁴ qui a conclu le projet. Citons en particulier :

- la ligne qui situe d'un côté la notion d'affichage haptique (*Haptic Display*) et plus généralement les principes de « l'affichage sensoriel » et de l'autre la notion d'interaction instrumentale ;
- l'analyse des techniques de modélisation de simulation et de synthèse à la lumière de la notion d'interaction éactive ;
- l'analyse des positionnements et technologies des « instruments numériques » pour la création musicale
- l'analyse des formats et standards des technologies de l'interactivité et de l'interaction ;
- l'analyse des structures technologiques des plateformes contemporaines de réalité virtuelle ;
- etc.

6.4.2. L'exemple de l'axe Multimodalité vs Multisensorialité : vers des interfaces *enactives* ou *multisensorielles* en vis-à-vis de l'unicité de la sensori-motricité humaine

Pour conclure cette section consacrée à nos travaux, nous discuterons de l'une de ces *lignes de force* qui s'organise autour des termes *multimodalité* et *multisensorialité*, car elle amène pensons-nous un éclairage nouveau sur nos travaux et sur les perspectives que nous développerons dans le dernier chapitre. Les analyses rapportées dans ce paragraphe ont été initiées et dirigées par A. Luciani.

Une difficulté porteuse d'une certaine confusion dans les domaines scientifiques concernés naît d'une imprécision terminologique quant aux notions de *multi-sensorialité* et de *multi-modalité*.

Résumons donc les acceptions des termes modalité et multi-modalité telles qu'elles s'entendent en sciences cognitives d'une part et dans les domaines technologiques qui nous intéressent d'autre part.

³³ J'ai été amené à participer aux travaux et collaborations internationales menés dans 3 *Work Packages* consacrés à la fusion sensorielle (geste/son/image), aux applications à l'apprentissage, aux applications artistiques. J'ai été le coordinateur, pour le laboratoire ICA, du *workpackage* dédié à l'étude et la proposition de formats et « standards ». J'ai été impliqué dans les travaux collaboratifs ayant trait aux architectures informatiques, aux applications à la création artistique et à la conception de formats.

³⁴ Ce livre, édité par A. Luciani et C. Cadoz, regroupe une collection de 200 termes et textes d'auteurs sur le thème des interfaces Enactives. Co-écrits par 58 auteurs et 12 contributeurs. En tant qu'éditeur assistant, j'ai soutenu les éditeurs A. Luciani et C. Cadoz dans la coordination des contenus de nature technologique, dans la coordination des auteurs des articles, dans le suivi de la rédaction ces articles et dans leur positionnement dans l'ensemble de l'ouvrage, ce jusqu'à leur finalisation.

Dans le domaine des sciences cognitives traditionnelles, le terme « modalité » (sensorielle) désigne un canal perceptif dans son unicité. Ainsi on parlera, par exemple, du canal visuel, du canal auditif ou du canal *perceptif* gestuel (perception tactile et kinesthésique). La perception, dans son ensemble, est intrinsèquement *multimodale* [Lagarde.07a], puisque plusieurs canaux sensoriels sont activés par les événements survenant dans l'environnement. La question se pose, alors, d'un possible processus cognitif *d'intégration multimodale* (d'intégration des percepts reçus des divers canaux) donnant naissance à une information de plus haut niveau cognitif [Lagarde.07b]. Le paradigme computationnel est, de façon générale, tout à fait affirmatif à ce sujet. Suivant cette approche, la perception et la cognition, composées de divers sous-systèmes traitant l'information, a notamment pour rôle d'analyser la cohérence des divers percepts pour (re)construire une représentation interne du monde [Pasquinelli.07b]. À l'inverse, l'approche enactive de la cognition, ne serait-ce qu'en niant l'idée suivant laquelle la cognition serait structurée par plusieurs sous-systèmes perceptifs (visuel, auditif...) ou cognitifs communicants, remet en cause l'hypothèse de l'existence d'une intégration multimodale par le système cognitif.

Dans les technologies des réalités virtuelles et de l'interaction personne-système, les termes « modalité » et « multimodalité » peuvent recouvrir deux significations.

La première est directement en lien avec la notion de modalité en sciences cognitives. Le terme multimodalité a alors trait à la capacité d'un système technologique d'adresser plusieurs des canaux perceptifs du sujet.

Dans seconde signification, plus spécifiquement proposée dans le domaine de l'interaction personne-système, une « modalité » (« d'interaction » ou « représentationnelle », *c.f.* section 4.6) est entendue comme un canal de *communication* par lequel des informations sont échangées (exprimées et/ou transmises) [DeBoeck.07]. Dans cette acception, une modalité d'interaction peut être, par exemple, la manipulation directe à la souris d'une représentation de l'objet d'intérêt, un langage informatique, « l'affichage » d'icônes sonores ou encore le langage naturel, écrit ou parlé, etc. Une interface (ou un système) multimodal(e) est alors une interface qui offre à l'utilisateur plusieurs *modes* pour exprimer ou interpréter l'information et plus généralement pour interagir avec le système dans la réalisation de sa tâche. Incidemment, diverses « modalités sensorielles » (canal gestuel, auditif visuel...) peuvent être sollicitées par une interface multimodale, voire par une « modalité d'interaction » donnée.

Dans les deux cas, il nous apparaît que la notion de *multimodalité* envisagée sous l'angle technologique est, pour des raisons historiques sans doute, très profondément marquée par les théories cognitives computationnelles [Varni&Castagné.07_#]. Traditionnellement, en effet, une *chose* (un concept, un document...) est donnée à percevoir à un sujet et/ou offert à l'interaction au moyen de plusieurs *modalités* – qu'il s'agisse de plusieurs modalités sensorielles (ou « canaux sensoriels ») ou de plusieurs modalités représentationnelles. Le sujet est alors supposé réaliser une *intégration multimodale* des informations qu'il reçoit (des différents canaux sensoriels ou par les différentes modalités représentationnelles) de telle sorte qu'il se construise une *représentation interne* de la situation.

Cette angle d'analyse a un impact majeur dans la constitution même des systèmes technologiques qui adressent plusieurs canaux sensori-moteurs – dans leur structure et dans la « philosophie » qu'ils représentent. Ainsi, une *ligne de force* contemporaine majeure conduit à ce que ces systèmes « multimodaux » soient intrinsèquement structurés en *plusieurs* sous-systèmes, typiquement un sous-système par canal sensoriel ou par modalité représentationnelle. On pourra parler par exemple du sous-système « visuel », « auditif » ou « gestuel » d'un système complet. Dans ce contexte, la conception des systèmes rencontre le problème d'avoir à déterminer les mécanismes de *communication d'informations* entre ces sous-systèmes [Castagné&Lagarde.07_#], qui sauront permettre que le sujet, au moyen du processus cognitif *supposé* d'intégration sensorielle, soit à même de *reconstruire* une représentation

cohérente de ce qu'on veut lui donner à percevoir et à comprendre. Ainsi, la notion de *modalité* issue de l'approche cognitive computationnelle structure-t-elle profondément la plupart des travaux technologiques [Varni&Castagné.07_#].

De façon générale, les travaux du groupe ICA-ACROE participent intimement de l'idée que le parallélisme évoqué sur ces notions entre sciences cognitives et technologies peut être envisagé d'une manière tout à fait différente, cette fois ci sous l'angle de l'enaction [Luciani.02]. Est en jeu ici, comme l'explique A Luciani, un changement de paradigme profond dans les technologies, qui permettrait de passer de la *multimodalité* à la *multisensorialité* [Luciani.07a].

Avec ce renversement de point de vue, il s'agit de permettre un investissement multisensori-moteur plus complet, plus entier, plus « enactif » du sujet, en vis-à-vis d'un « *objet virtuel intrinsèquement multisensoriel* ». Un système technologique *multisensoriel* (et non plus *multimodal*), ou enactif, serait alors un système qui, en lieu et place de plusieurs sous-systèmes communicants, mettrait en œuvre un calcul unique, auto-cohérent et multi-sensoriel. Cette unicité du calcul (disons : du modèle) est à rapprocher de la façon dont l'enaction conçoit la sensori-motricité comme un tout indivisible. Certes, le sujet interagît avec le modèle multi-sensoriel unique par plusieurs canaux sensori-moteurs, chacun adressé par une technologie de transduction adéquate : écran, haut-parleur, interface haptique, etc. Mais il n'est plus question de devoir re-corréler ces stimuli « artificiellement » par des protocoles d'échange d'informations entre sous-systèmes ou sous-modèles. Dans cette approche, en effet, c'est dans les calculs inhérents au « modèle enactif » que s'élabore « naturellement » une corrélation très forte entre les stimuli et plus encore un couplage fort des sorties aux entrées (au geste).

Ce positionnement se situe aujourd'hui aux limites mêmes de l'état de l'art. Pour ne donner qu'un exemple, la détermination des concepts essentiels devant être retenus pour fonder de tels systèmes et les modèles intrinsèquement multisensoriels qui les caractérisent, à même de se substituer au principe d'une interconnexion « latérale » entre les sous-parties de l'approche classique, est une question encore très ouverte. Plus généralement, ce positionnement appelle un certain nombre de transformations profondes dans l'approche des machines numériques avec lesquelles l'être humain interagît, dans les méthodologies de leur conception et dans leur principes fondateurs.

En la matière, constatons que les notions d'interaction et de couplage instrumentaux, d'ergoticté, de simulation physique, de calcul temps réel dur synchrone ou encore l'idée que le formalisme des réseaux physiques permet d'envisager *transversalement* la modélisation et la simulation de *tout* comportement dynamique à l'échelle de la sensori-motricité humaine, notions proposées par le groupe ICA-ACROE et dont il a été fait état dans ce mémoire, apparaissent bien constituer un socle de portée fondamentale.

C'est dans ce contexte que nous inscrivons désormais nos perspectives de recherche.

7 Perspectives : technologies logicielles de la modélisation, de la simulation et de l'interaction multisensorielles instrumentales pour la création

7.1 Constats

Afin d'illustrer, dans ce chapitre, de quelles manières nos travaux décrits dans les chapitres 2 à 6 se prolongent dans des perspectives de recherche, il nous semble utile de résumer, sous forme de quelques constats, les fils directeurs qui les ont animés.

Premier constat : la dimension technologique de notre démarche. Nos travaux ont été animés par la perspective de parvenir à de nouveaux outils logiciels. Cette visée technologique a été présente aussi bien dans la réalisation effective de ces outils que dans les travaux de nature théorique ou de positionnement dans l'état de l'art. Par ailleurs, nous avons tenté de définir une méthodologie de « démonstration par l'outil », dans laquelle l'outil, moyen indispensable à l'expérimentation des activités nouvelles qu'il rend possible, contribue à la preuve d'une hypothèse scientifique. *Une recherche sur, pour et par l'outil*, en quelque sorte. Encore fallait-il, afin que la démonstration soit probante, que les outils réalisés soient amenés à un niveau conséquent de qualité ingénieuriale et de maturité.

Second constat : le caractère multidisciplinaire de nos travaux. A l'origine inscrites dans le domaine de l'informatique musicale, nos contributions ont progressivement concerné également l'informatique graphique, le domaine des réalités virtuelles, l'haptique et l'interaction personnes/systèmes (IHM). J'ai eu ainsi, l'occasion de cosigner des publications dans chacun de ces domaines. Nos travaux ont donc progressivement acquis une dimension pluridisciplinaire, tout en demeurant dans le cadre général des sciences et technologies de l'information et de la communication. Incidemment, notons que cette dimension est, bien que dans une moindre proportion, à l'image du caractère multidisciplinaire du programme du groupe ICA-ACROE. Nous précisons dans la suite de ce chapitre comment cette particularité peut constituer à la fois un atout et une difficulté pour l'avenir.

Troisième constat : au cours de nos travaux de recherche et d'ingénierie logicielle, nous avons progressivement étendu le **champ des compétences technologiques convoquées**. Ces compétences se situent d'abord en conception et programmation de systèmes interactifs, en architecture logicielle, en génie logiciel, pour les environnements de modélisation. Puis, quoi que dans une moindre mesure, elles se sont étendues à la programmation des pipelines graphiques, à la programmation embarquée et à l'architecture logicielle des systèmes temps réel pour les logiciels de simulation. Cette disposition constitue, pensons-nous, un atout pour le projet que nous formulons aujourd'hui.

Quatrième et dernier constat : chacun des travaux auxquels nous avons participé peut être analysé comme une contribution à l'élaboration progressive d'une « **Machine multisensorielle pour la création instrumentale** ». La perspective de cette machine a motivé mon insertion dans le groupe il y a plus de 15 ans. Elle a ensuite été motrice de mes travaux, chacun pouvant être considéré comme un pas vers cette machine en devenir. Il n'est donc pas étonnant qu'elle structure, encore aujourd'hui, mes perspectives de recherche.

Nous présentons ces perspectives dans la suite de ce chapitre.

La section 7.2 précise les attendus d'une orientation d'ensemble des recherches vers une « Machine Multisensorielle Instrumentale » et initie une discussion sur les implications et les conséquences prévisibles d'une telle orientation.

La section 7.3 est consacrée à une description d'axes de recherche auxquels j'ai projet de contribuer à l'avenir, aussi concrète que faire se peut sans entrer dans trop de détails. Y sont décrites des perspectives qui s'inscrivent dans la continuité directe de mes principales contributions antérieures, en informatique graphique et en informatique musicale, ainsi que des perspectives plus large, qui en constitueront le prolongement.

7.2 Au delà des cadres disciplinaires établis : technologies logicielles pour l'interaction et la création multisensorielles instrumentales

Il est évident que mes activités futures, au moins pour les premières années, se conçoivent comme une projection dans la continuité de mes travaux passés, menés en collaboration avec les diverses équipes du groupe et que je poursuivrai ces collaborations, prenantes et passionnantes, dans les contextes disciplinaires respectifs du son et de l'image.

Au delà, mon objectif est de contribuer à l'éclosion de cette *Machine multisensorielle pour la création instrumentale* déjà en gestation dans le groupe. Ce projet s'inscrit donc bien évidemment en continuité directe avec les attendus du programme de recherche du groupe, annoncés dès les années 70. De plus, il est évident que, de par son ampleur, il ne saurait être ni conduit, ni même défini qu'en équipe. Comment alors situer mes contributions futures au sein de cet effort collectif ?

Nous envisageons que mes contributions se situent essentiellement dans le thème des **technologies logicielles de la modélisation, de la simulation, de l'interaction et de la création multisensorielles instrumentales**.

Sous l'angle des sciences et technologies de l'information et de la communication, voire plus précisément sous l'angle des systèmes logiciel, il s'agira donc essentiellement *d'œuvrer à la caractérisation et à la réalisation des composants logiciels de modélisation et de simulation synchrone d'une plateforme de création multisensorielle instrumentale complète* qui, bien sûr, sera basée sur la modélisation et la simulation avec les réseaux physiques. Il s'agira par ailleurs, dans la continuité des démarches que j'ai pu adopter jusqu'ici, *de contribuer à aux positionnements théorique, bibliographique, technologique et artistique de cette plateforme et à l'élaboration et la mise en perspective des concepts qu'elle réifie dans les communautés scientifiques et artistiques concernées*.

Essayons maintenant de cerner les aspects essentiels et les conséquences à terme cette évolution.

7.2.1. Instrumentalité, multisensorialité et création artistique

D'une manière générale, les notions d'instrumentalité et de multisensorialité adressent toutes les situations où l'habileté manuelle et l'accomplissement de gestes et de manipulations experts (« situations instrumentales ») sont en jeu. Plus généralement, nous pensons qu'elles sont susceptibles de concerner toutes les situations où ces notions gagneraient à être convoquées dans le contexte de l'interaction personne-système.

Toutefois, pour ce qui concerne notre projet, nous entendons conserver une place prépondérante à la création artistique. La création y jouera un rôle central, en tant que contexte applicatif privilégié, en tant que source de motivation, mais aussi en tant que moteur à même de stimuler, de par ses exigences particulièrement critiques, les découvertes scientifiques et les réalisations technologiques de l'instrumentalité multisensorielle numérique.

Le centrage sur le thème de l'instrumentalité multisensorielle ne pourra aller sans qu'on pose les questions sur ce qu'il implique sur les pratiques artistiques, l'art et la création. On le pressent à tout le moins en considérant que la musique, la danse, les arts graphiques se sont développés séparément, de manière quasi monolithique, en parallèle – et que ces domaines artistiques restent si profondément structurant dans les pratiques, les pédagogies et les œuvres.

Pour illustrer notre positionnement, nous ferons remarquer d'abord qu'en matière de création numérique, qu'il s'agisse d'une œuvre purement plastique et destinée *uniquement* à l'œil du spectateur, ou purement musicale et destinée *uniquement* à l'oreille de l'auditeur, il demeure selon nous nécessaire que les « instruments numériques » utilisés dans sa production soient pour l'artiste premièrement « suffisamment instrumentaux » et deuxièmement « réellement multisensoriels ». Il faut donc que ces instruments numériques incorporent et mettent en synergie gestes, sons et images. En quelques sortes, et de façon un peu cavalière, il faut donc que le « pinceau numérique » fasse du bruit (cohérent), ou encore que le « violon numérique » fasse de l'image (cohérente).

Au delà, peut-on envisager que « l'instrumentalité multisensorielle numérique » permette à terme l'émergence de formes d'art nouvelles – un « art des objets multisensoriels », peut-être ? Si la question reste entière, j'espère pouvoir contribuer à son analyse.

7.2.2. Recadrages

Ces remarques étant faites, on voit que notre projet aurait tendance à suggérer deux recadrages qui, par ailleurs, nous semblent déjà en train de s'initier :

1. Celui qui consiste à poser résolument *de façon conjointe* les problématiques relatives à la modélisation et les questions relatives à la simulation.
2. Celui qui consiste à diminuer progressivement le relatif cloisonnement disciplinaire des travaux en fonction des canaux sensoriels et catégories de phénomènes visés.

Chacun de ces deux recadrages peut s'exprimer à trois niveaux : celui de mon propre parcours de chercheur et des compétences convoquées, celui du groupe et de ses modalités de travail, celui enfin, plus fondamental, du positionnement des travaux dans les domaines scientifiques, technologiques et artistiques tels qu'ils sont aujourd'hui organisés dans la société.

Aborder conjointement les problématiques de la modélisation et de la simulation

Le premier recadrage consiste en ce que, progressivement, la problématique de la modélisation (et les sciences, technologies et savoir-faire associés) et la problématique de la simulation instrumentale multisensorielle (et les sciences, technologies et « savoir-jouer » associés) soient systématiquement et résolument abordées de concert. A titre personnel, ce recadrage impliquerait d'intensifier l'extension de mes travaux à l'ensemble des composantes logicielles convoquées. Cela voudrait dire d'étendre mon domaine de contribution à toutes les recherches

technologiques relatives aux logiciels de la modélisation *et* de la simulation. Cette diversification a déjà été initiée ces dernières années dans mon parcours de chercheur. Eu égard aux compétences scientifiques, technologiques et ingénieriales convoquées, je pense qu'il me faudrait essentiellement continuer et amplifier mon implication dans les principes et les technologies du calcul temps réel dur synchrone (plateforme matérielle et logicielle, moteurs de simulation, squelette de calcul...).

Réduire le cloisonnement disciplinaire aujourd'hui basé sur les catégories applicatives et les modalités sensorielles

Le second recadrage consiste à dépasser progressivement le relatif cloisonnement en catégories disciplinaires des travaux qui nous intéressent : informatique graphique, informatique musicale, haptique, réalités virtuelles. Ce cloisonnement relatif s'opère aujourd'hui en fonction des catégories d'applications visées et des canaux sensoriels adressés par les technologies et les pratiques créatives. Il s'agirait alors de s'appuyer :

1. sur le fait que, dans leurs principes mêmes, les concepts et technologies portés par le groupe sont *par nature* trans-disciplinaires et trans-sensoriels,
2. sur le concept d'instrumentalité, qui transcende la notion de modalité sensorielle ou de catégorie de pratique artistique,
3. sur la visée d'une machine qui soit instrumentale, et donc intrinsèquement multisensorielle,

pour conduire une recherche qui, en conséquence, devrait au moins en partie échapper à la séparation des domaines aujourd'hui concernés.

A titre personnel, ce recadrage se présente dans la continuité d'une évolution naturellement à l'œuvre depuis 10 ans et qui, partant de travaux clairement ancrés en informatique musicale, m'a conduit à œuvrer (et à publier) dans d'autres domaines. Cette évolution a été naturelle en ce sens que les problématiques de la modélisation « pour l'image » ou « pour le son » avec les réseaux physiques se sont progressivement exprimées, ces dernières années, dans la réalisation de briques logicielles communes. On peut toutefois aussi y lire un souhait plus personnel : celui d'œuvrer non pas à de « meilleures musiques numériques » ou « meilleures images numériques », mais plutôt *in fine* de questionner le concept d'instrumentalité, à travers les outils de création qui tentent de lui donner corps dans les contextes numériques. C'est bien ce qui constitue le cœur de mes perspectives.

Soyons conscients, cependant, de ce qu'un tel recadrage vers une plus grande trans-disciplinarité dans les assises du travail et dans ses objectifs, n'est pas sans poser questions et problèmes. Au niveau personnel, comme le montre mes lieux de publications, l'évolution de mes travaux ces dernières années s'est accompagnée d'une difficulté croissante à les rattacher, ne serait-ce que de façon principale, à un secteur disciplinaire bien défini et, partant, à une communauté scientifique constituée unique. Or, si la possibilité d'un tel rattachement n'est peut-être pas chose indispensable, il apparaît profitable en recherche pour plusieurs raisons : participation à la vie communautaire, sociétés savantes, participation à des comités éditoriaux, suivi de l'état de l'art au plus près de sa transformation, etc.

De fait, à quelle discipline, à quelle communauté, à quel état de l'art, rattacher un effort de recherche commun qui s'intéresse à l'instrumentalité et la multisensorialité et à leurs technologies ?

Il ne peut s'agir exclusivement de l'un des grands secteurs disciplinaires actuels. Aucun d'entre eux en effet, que ce soit l'informatique, l'automatique et la robotique, le traitement du signal, la physique, l'électronique, la mécanique, les systèmes dynamiques ou encore les sciences cognitives, ne recouvre à lui seul les recherches qui doivent être conduites.

On retrouve ce même problème dans les disciplines plus « aval ». On ne peut ancrer ces travaux exclusivement dans le domaine de l'haptique, dans celui de l'informatique musicale ou dans celui de l'informatique graphique. On ne peut non plus envisager un rattachement exclusif aux réalités virtuelles, étant entendu que ce secteur est profondément marqué à la fois par une certaine primauté de l'image et par les questions de l'immersion sensorielle et de la navigation dans les grands espaces, qui nous intéressent peu. De fait, le domaine des réalités virtuelles est peu réceptif à la notion d'instrumentalité telle que nous l'avons exposée dans ce mémoire. L'interaction personnes-systèmes (IHM) n'est pas d'avantage pleinement adaptée, ne serait-ce que parce qu'elle se positionne avant tout sur les IHM dans lesquelles les situations interactives sont analysées à un haut niveau sémantique, en tant que moyen pour réaliser une « tâche » en général clairement identifiée – ce qui échappe, pensons-nous, à l'instantanéité de l'interaction instrumentale et, dans une certaine mesure, à la démarche de création. Quant au « multimédia », outre qu'il ne s'intéresse guère au geste et est majoritairement tourné vers le secteur économique et la diffusion, il porte dans son nom même, mais aussi dans ses principes, l'idée d'un montage de médias exogènes et d'une juxtaposition des « modalités » sensorielles – choses qui s'opposent à l'instrumentalité et la multisensorialité telles que nous les envisageons.

Il faudrait donc s'efforcer d'adresser de façon réfléchie et équilibrée *chacun* de ces domaines. Mais cela ne saurait être une démarche pleinement satisfaisante, ne serait-ce que parce qu'elle ne saurait permettre une inscription forte, pleine, un « rôle moteur » dans l'une ou l'autre des communautés correspondantes.

Pour donner un cadre et une dynamique à notre projet, mais plus encore parce que cela nous semble souhaitable pour relever les défis scientifiques du futur, au delà de la fragmentation de la sensori-motricité en « modalités sensorielles », à l'œuvre aussi bien en science cognitives que dans les technologies, sans nier les différences entre les technologies « de l'œil », « de l'oreille et « du geste », nous formulons le souhait d'œuvrer, autant qu'il est possible, à la co-fondation, l'organisation et l'animation d'un nouveau secteur de recherche multidisciplinaire de « l'ordinateur sensoriel³⁵ » ou de « l'ordinateur instrumental ». Son objet général pourrait être de contribuer à ce que les technologies numériques puissent devenir un vis-à-vis pleinement pertinent pour la multisensori-motricité humaine – un instrument à la mesure réelle de la finesse, de la sensibilité, de la complexité de nos capacités multi-sensori-motrices instrumentales, qui rivalise enfin avec la finesse, la sensibilité et la complexité des qualités instrumentales atteintes par les instruments mécano-acoustico-visuels non numériques, tout en offrant les possibilités inhérentes à l'ordinateur.

Nous mesurons, bien évidemment, le caractère ambitieux et risqué d'un tel objectif et les nombreuses difficultés qu'il adresse. Il ne peut être assumé, bien sûr, à l'échelle d'un individu, ni même d'un groupe. A l'appui de l'espoir qui nourrit ces perspectives, nous pouvons toutefois apporter le témoignage du réseau d'excellence européen *Enactive Interfaces* (2004-2007, coordination scientifique A. Luciani, voir section 6.4) qui, de par ses objectifs, son organisation et le caractère largement transdisciplinaire de ses travaux et de leurs résultats, peut être vu comme une illustration de la pertinence du décentrage (ou recentrage) disciplinaire que nous défendons, et comme des prémices pour sa possible pérennisation.

Enfin, notons que le groupe ICA-ACROE a des atouts théoriques et technologiques certains pour pouvoir jouer un rôle important, si ce n'est moteur, au sein de cet hypothétique nouvel « axe disciplinaire ». En effet, comme il a été indiqué dans ce mémoire, avec le concept de la « simulation multisensorielle interactive d'objets physiques », avec ses analyses de la situation d'interaction instrumentale, avec, enfin, ses technologies déjà conçues et démontrées (modélisation physique, formalisme de modélisation, transducteurs à retour d'effort, simulation temps réel, environnements de modélisation...), le groupe est porteur de propositions fortes pour aborder la question de « l'ordinateur sensori-moteur ».

³⁵ Le terme est d'A Luciani – proposé dans le cadre de sa responsabilité scientifique du réseau européen *Enactive Interface*, 2004-2007.

7.3 Quelques axes de travail

Nous voilà parvenus, au terme de ce mémoire, au moment de préciser d'une manière plus concrète les axes de travail auxquels j'ai le projet de contribuer désormais. Dans cet objectif, cette section propose d'abord des éléments de problématisation dans les états de l'art des domaines scientifiques concernés, puis quelques pistes pour des travaux à visée technologique sous le thème des « logiciels de l'instrumentalité ».

7.3.1. Éléments de problématisation dans les états de l'art des domaines concernés

Les éléments de problématisation ici exposés sont parfois issus de mes travaux et publications passés, parfois hérités de travaux menés par des collègues (entre accolades dans ce qui suit). Certains sont aussi récents et donc encore fragiles. Dans tous les cas, leur clarification est partie intégrantes des travaux que je compte mener.

Problématisation Réalités Virtuelles et Haptique : vers des réalités virtuelles « vis-à-vis » fondées sur les qualités dynamiques et intégrant la dimension sonore {Luciani et al}

Dans le contexte des réalités virtuelles, suivant les propositions d'A. Luciani, il nous semble pertinent de défendre l'idée que des réalités virtuelles « vis-à-vis » [Luciani.07b], ou « instrumentales », soient considérées en tant que nouvelle catégorie, aux côtés des réalités virtuelles « immersives » qui sont aujourd'hui les plus développées. Le propos serait alors de cerner et positionner ce type de réalités virtuelles, et d'en analyser les nécessités essentielles.

L'un des critères discriminant pourrait être ici celui des qualités dynamiques [Luciani.07b]. Traditionnellement, la réalité virtuelle prend en considération des « objets virtuels spatiaux » associés en particulier à des tâches de navigation dans des scènes maillées tridimensionnelles. Il s'agira ici de continuer à questionner la possibilité et la pertinence de « réalités virtuelles dynamiques », qui mettent plutôt l'accent sur les qualités dynamiques des simulacres et de l'interaction que le sujet entretient avec les « objets » virtuels.

Un deuxième axe consistera à étudier le principe de réalités virtuelles « vis-à-vis » *sonores*, voire multisensorielles adressant en particulier le canal sonore [Luciani et al.05_#] [Leonard et al.14_#].

Problématisation IHM : multi-modalité / multisensorialité {Luciani, Castagné & al}

Dans le contexte de l'interaction personne-système (IHM), il nous paraît qu'il serait pertinent de poursuivre le positionnement de l'instrumentalité multisensorielle en tant que modalité d'interaction (ou « représentationnelle »). Il pourrait s'agir ici de montrer que, considérée en tant que modalité d'interaction, la « modalité instrumentale »³⁶ a ceci de particulier que, plus peut-être que toute autre modalité, elle constituerait dans le contexte du numérique une prolongation d'une de nos relations au monde les plus immédiates et « naturelles », de tous les instants. Comme pour d'autres modalités d'interaction étudiées en IHM, il faudrait toutefois encore en définir la portée, en préciser des cas d'usage, en étudier les nécessités technologiques, etc.

Ce travail pourrait en outre conduire, dans le contexte des *interfaces multimodales*, à affiner l'étude théorique des différences essentielles entre les notions de multi-modalité et de multisensorialité. Les interfaces multimodales contemporaines qui adressent plusieurs capacités sensori-motrices humaines tendent à être structurées en *plusieurs* sous-systèmes communicants, typiquement un sous-système par canal sensoriel ou par modalité représentationnelle [Varni&Castagné.07_#] [Castagné&Lagarde.07_#]. Le sujet est alors supposé réaliser une *intégration multimodale* des informations qu'il reçoit (des différents canaux

³⁶ Au sens, bien sûr, où nous l'entendons dans le groupe et dans ce document – et non pas par exemple au introduit en IHM, par M. Beaudouin-Lafon [Beaudouin.00].

sensoriels ou par les différentes modalités représentationnelles). Dans ce contexte, ce projet propose une approche structurellement différente, puisqu'il s'agit d'envisager que le calcul d'un modèle physique unique permette de générer en cohérence l'ensemble des phénomènes dynamiques adressés aux divers canaux sensoriels [Luciani.07]. On pourra s'interroger ici sur les qualités effectives des corrélations sensori-motrices ainsi permises. Plus généralement, dans le contexte des interfaces multimodales, se pose la question des positionnements relatifs de ces deux catégories d'approches, tant au niveau théorique qu'en matière de technologie.

Problématisation Informatique Musicale et Nouvelles Interfaces pour l'Expression Musicale : du paradigme du contrôle à celui du couplage instrumental {Cadoz, Castagné}

En informatique musicale, il nous apparaît que le principe des réseaux physiques est en bonne voie pour être durablement reconnu comme l'une des principales catégories d'approche de la modélisation physique pour la musique – ce qui, incidemment, n'était pas chose évidente il y a quelques quinze années. La démonstration de sa pertinence nous semble désormais bien avancée, et nous pensons y avoir contribué de par la maturité des technologies auxquelles nous avons contribué, mais aussi bien sûr de par les usages qui en sont faits et les œuvres qui en résultent.

De façon corolaire, il nous semble que les principales propriétés des réseaux physiques, qui les distinguent d'autres approches et signent leurs intérêts propres, commencent à être relativement bien reconnues en informatique musicale. Ces propriétés, déjà largement discutées dans ce mémoire, sont en particulier : la modularité, la facilité d'accès et le fait que, n'étant pas cantonnée à la synthèse de sons, l'approche permet d'envisager de façon originale et pertinente un propos créatif complet, incluant la dimension compositionnelle (une « école », peut-être ?). Un questionnement, dès lors, consiste à étudier plus précisément dans quelle mesure les réseaux physiques sont réellement susceptibles de devenir, à terme, l'un des quelques cadres formels majeurs pour les musiques numériques, d'importance peut-être comparable au principe de la synthèse et du traitement modulaire du signal sonore, à celui du séquençement des sons, ou encore celui des représentations mathématiques des formes et théories musicales.

Dans le contexte de l'informatique musicale, notre projet adresse également bien sûr la situation de jeu temps réel, c'est à dire le domaine des nouveaux instruments pour la création musicale. Dans ce contexte, des questions sont ouvertes. Comme nous l'avons déjà indiqué, le paradigme dominant est aujourd'hui celui du *contrôle de synthèse* : les signaux gestuels acquis au niveau des transducteurs gestuels sont appliqués (*mappés*) par des procédés variés sur des paramètres quelconques de techniques de synthèse [Castagné&Lagarde.07_#]. Notre projet pourra conduire à poursuivre le positionnement du paradigme de *l'interaction et du couplage instrumentaux* [Castagné.07a_#] en regard de celui du *contrôle de synthèse*. Ce renversement de point de vue pourrait conduire à reconsidérer la relation entre la machine numérique musicale temps réel et son utilisateur.

Positionnement Informatique Graphique : les réseaux physiques dans le contexte de l'image animée {Luciani}

Si les réseaux physiques et les technologies de modélisation et de simulation associées sont aujourd'hui bien situés en informatique musicale, la situation est nous semble-t-il plus délicate en informatique graphique. Comme évoqué dans certaines publications d'A. Luciani et dans nos analyses de la section 3.1, plusieurs raisons y concourent sans doute.

Une première idée est que les recherches dans le domaine de l'informatique graphique sont, certainement plus qu'en informatique musicale, dirigées par les besoins du secteur industriel : cinéma 3D, jeux vidéo, visualisation de données, par exemple. La perspective de la création (les « *fine arts* », en anglais) y est donc proportionnellement moins présente. Or : 1/ ces applications industrielles accordent une importance cruciale au caractère de « réalisme » des artefacts. 2/ les « modèles spécifiques », adaptés au cas par cas sont souvent préférés à des approches plus génériques. Et 3/ les projets d'animation ont souvent la capacité de réunir des équipes larges,

aux compétences multiples, pour lesquels le caractère d'utilisabilité des méthodes employées est moins critique que pour un artiste, qui doit en général pouvoir agir avec plus d'autonomie.

Une seconde idée tient au fait que l'informatique graphique accorde une place prépondérante aux questions de la modélisation de la forme 3D et des procédés de rendu. Le domaine de l'animation s'intéresse alors surtout à des procédés d'animation *qui s'appliquent* à des formes 3D préexistantes. La méthode générale proposée et défendue par l'équipe image du groupe, consistant à ce que la question de la génération du mouvement soit préalable *puis* que ce mouvement soit ensuite mis en forme, prend ainsi le contrepied direct des usages et tendances des recherches en animation.

Une troisième idée enfin est que, au delà des explications historiques, la dualité forme mouvement inhérente au canal visuel interroge de manière fondamentale les technologies et processus de l'image animée.

Ainsi, alors même qu'ils sont pourtant à visée générique, les travaux du groupe en informatique graphique sont relativement délicats à positionner, à défendre et à valoriser. Il est donc important de contribuer, sous la responsabilité d'A. Luciani et dans la continuité de son action, à une meilleure compréhension et une meilleure dissémination des idées, des connaissances et des savoir-faire associés.

Positionnement des réseaux physiques en Informatique Graphique

Il s'agirait d'abord de poursuivre la mise en évidence des propriétés fondamentalement différentes des réseaux physiques pour l'animation, comme nous y avons contribué par le passé en Informatique Musicale. Au delà, il s'agirait de poursuivre une recherche de nature à la fois scientifique, technologique et artistique, qui questionne à un niveau fondamental la notion même d'image animée, les processus de sa cognition, les processus de sa création et les technologies proposées pour porter ces processus. L'identification des questions qui se posent ici et leur analyse est un travail constant de l'équipe image du groupe. Mon objet en les évoquant ici est d'une part d'affirmer que ces études me semblent importantes pour l'avenir et d'autre part indiquer, en manière de perspectives, que je souhaite y contribuer.

Une recherche qui pose la question des systèmes et environnements logiciels

En informatique graphique, différemment à l'informatique musicale, les travaux et publications concernent essentiellement des modèles et algorithmes spécifiques à une situation donnée, ou des catégories d'algorithmes. A l'inverse, peu de travaux et d'articles questionnent la mise en œuvre de systèmes logiciels génériques et utilisables. Dans ce contexte, nous avons l'espoir d'apporter une contribution au développement de ce qu'on pourrait appeler une « culture des systèmes » en informatique graphique, comme elle existe déjà en informatique musicale. Nous défendrons ainsi l'idée que la créativité numérique, au delà des méthodes et algorithmes auxquels elle a recours, est très profondément liée à ce que sont les outils, systèmes et environnements qui la supportent, dans leurs fonctionnalités et dans leurs ergonomies - et que par conséquent il est nécessaire de concevoir ceux-ci dans une démarche et avec une méthodologie de recherche. Dans cette direction, pensons-nous, les savoir-faire du groupe ICA-ACROE et notre propre parcours constituent des atouts.

Adresser la multi-sensori-motricité humaine au travers des qualités dynamiques

J'espère, enfin et plus généralement, contribuer à l'élaboration et à la dissémination des concepts de l'instrumentalité numérique et au positionnement théorique du formalisme de modélisation et de simulation des réseaux physiques, en le situant au regard d'autres approches et en continuant l'analyse de ses caractéristiques essentielles – telles que la modularité, le pouvoir générateur, l'utilisabilité et le fait qu'il constitue un cadre formel fort à même de structurer aussi bien la pensée que les technologies.

Dans ce contexte, dans la continuité des analyses de la section 6.4, nous comptons œuvrer encore à la mise en évidence du degré effectif de généralité du principe des réseaux physiques

pour la modélisation et la simulation de *tout phénomène dynamique mécanique à l'échelle de la sensori-motricité humaine, indépendamment des canaux sensori-moteurs adressés*. On pourra notamment s'intéresser au positionnement théorique de la proposition suivant laquelle un modèle physique *unique*, conçu dans son ensemble modéliserait la totalité des phénomènes dynamiques recherchés, serait ainsi capable de générer tous les comportements mécaniques à la fois à l'échelle de l'œil, de l'oreille et du geste et serait garant de la cohérence, notamment énergétique, de tous les stimuli gestuels, visuels et sonores en réaction au geste.

7.3.2. Perspectives en matière de recherche technologique et d'innovation

Informatique musicale : perspectives de travaux autour de l'environnement GENESIS

Dans la continuité des travaux autour de l'environnement de création musicale GENESIS, deux chantiers de recherche technologique paraissent importants pour les années à venir : celui de la conception d'outils de modélisation « de haut niveau » et le projet de Modeleur-Simulateur pour la Création Instrumentale Musicale.

Axe « outils de haut niveau pour la maîtrise de la complexité en modélisation musicale »

Cet axe poursuit les travaux rapportés dans les chapitres 2 et 4.

Le premier chantier consiste à accompagner l'équipe son de C Cadoz vers un nouvel incrément d'échelle dans la complexité des modèles réalisables. Pour ne donner qu'un indice quantitatif de ce changement d'échelle, il s'agirait de permettre la réalisation de modèles composés de millions de modules – en lieu et place des dizaines ou de la centaine de milliers de modules aujourd'hui exploités. En matière d'usage, ce changement d'échelle est rendu nécessaire pour la réalisation de modèles musicaux compositionnels de grande taille, afin que le principe de « composition avec les modèles physiques », découvert et emmené par C Cadoz, puisse s'affirmer en dehors des travaux de recherche musicale « en laboratoire », et pour que se développe plus avant l'exploration de ses potentiels musicaux.

La puissance des machines désormais disponibles permet d'espérer ce changement d'échelle en matière de simulation. Mais ce possible « technique » n'est rien si l'utilisateur-modélisateur ne dispose pas des moyens logiciels lui permettant d'appréhender la complexité croissante des réseaux physiques qu'il conçoit. Il s'agit donc, ici, de rechercher les fonctionnalités et les ergonomies qui permettront un niveau inédit de complexité dans la conduite et dans les résultats de l'activité de modélisation. Nous pouvons utiliser, au moins à titre provisoire, le terme « d'outils de haut niveau de modélisation pour la musique ». Ces outils devront concerner l'édition de la topologie des réseaux (réseaux à topologie régulière ou pseudo-régulière de très grande taille) ainsi que l'édition des paramètres physiques des modules. Mais ils devront aussi, à l'extrémité inverse du processus, s'intéresser aux significations musicales portées par les réseaux en cours de conception.

Un premier aspect a trait à l'extension de la version de CORDIS-ANIMA sous-tendant GENESIS : nouveaux modules, non linéarités complexes, etc. Il pourra en outre s'agir de repenser la question de l'intérêt des modèles sonores et musicaux *multi-dimensionnels* pour la musique – en lieu et place des modèles unidimensionnels actuellement utilisés (section 5.1).

Au cœur du modeleur, la possibilité de nouveaux modes de collaboration entre modalité d'interaction³⁷ graphique et modalité d'interaction textuelle, déjà évoquée dans le chapitre 4.7, pourra être étudiée plus avant, de même que la réalisation d'un « éditeur évolué de paramètres » permettant de calculer un grand nombre de paramètres suivant des lois diverses.

Par ailleurs, dans la continuité des fonctionnalités d'analyse modale de GENESIS³, il sera intéressant d'intégrer au modeleur et ainsi aux processus de création les outils traitant du « problème inverse » [Villeneuve.12], dont le principe est de générer ou modifier un réseau

³⁷ Au sens de l'Interaction Personne-Système (IHM).

physique à partir d'un jeu de propriétés désirées. A plus long terme, il pourrait être intéressant de questionner la faisabilité et la pertinence d'intégrer aux processus de modélisation dans GENESIS des systèmes de règles et des algorithmes d'optimisation – tels que par exemple des algorithmes génétiques³⁸.

Enfin, d'autres études devront permettre d'accompagner le processus compositionnel musical. Dans la méthodologie de « composition avec les modèles physiques » les macro-formes musicales sont émergentes parce qu'encodées dans les propriétés dynamiques mêmes des réseaux. C'est d'ailleurs là l'un des intérêts de la démarche. Il n'en reste pas moins que la mise à jour de fonctionnalités permettant la maîtrise de ce « niveau compositionnel » est nécessaire. Sans rien enlever aux processus modulaires, élémentaires et fondateurs de modélisation avec les réseaux physiques (accès individuel à chaque module, connexions, paramètres physiques, état initial du système dynamique, habillage...), il s'agirait ici notamment d'introduire dans l'environnement logiciel des représentations éditables de plus haut niveau, plus directement représentatives des contenus musicaux portés par les modèles. Ici se profile un hypothétique « mode composition » au sein de l'environnement, qui permettrait peut-être d'agir à un niveau sémantique plus proche des finalités musicales et compositionnelles.

Axe « Modeleur-Simulateur pour la Création Instrumentale Musicale »

Cet axe poursuit les travaux rapportés dans la section 6.2.

Le projet Modeleur-Simulateur pour la Création Instrumentale Musicale » (MSCI-M)³⁹ prend la suite du travail GENESIS-Temps Réel. Rappelons brièvement ses objectifs. Il s'agit de permettre, pour la toute première fois, l'expérimentation en situation de création musicale effective des principes de l'interaction instrumentale, telle que définie par C Cadoz et réexposée dans ce mémoire. Pour ce faire, il s'agit de réaliser un modeleur-simulateur satisfaisant les principes de l'instrumentalité, en assemblant les capacités de l'environnement interactif de modélisation physique GENESIS avec les technologies de simulation instrumentale ERGON du groupe. Il deviendra alors possible de concevoir ses propres instruments musicaux virtuels, puis d'entrer en interaction instrumentale avec eux lors de la simulation.

Il n'est pas nécessaire d'indiquer en quoi cette perspective est essentielle du point de vue de GENESIS, dont les calculs de simulation étaient jusqu'alors effectués « hors ligne ». De l'autre point de vue c'est à dire de celui des plateformes d'interaction instrumentale, le fait de disposer d'un modeleur véritable ouvre des perspectives inouïes d'applications, notamment pour la mise au point des modèles.

Ainsi ce projet devrait constituer, à son aboutissement, un point d'avancement majeur dans les réalisations projetées depuis la fondation du programme de recherche. En les abordant avec la perspective de la création musicale, le projet MSCI constitue *de facto* une première marche vers des travaux de visées plus générales. Incidemment, et bien évidemment, ce projet est aussi tout à

³⁸ A ce sujet, il nous semble que la confrontation en recherche de cadres formels « bien posés » chacun dans leurs domaines, a le pouvoir, souvent, de stimuler les découvertes scientifiques. A titre d'exemple, dans le projet DYNAMÉ, le positionnement respectif des modèles physiques masses-interactions et des modèles topologiques pour les processus de l'image animée aura été structurant, enrichissant et moteur. Dans le cas ici évoqué, qui convoquerait les formalisme des « réseaux physiques » et celui des « algorithmes génétiques », on pourrait nous semble-t-il également espérer des résultats intéressants. Par exemple, les algorithmes génériques pourraient être pertinents pour faire évoluer par mutation/sélection (de la topologie, des paramètres...) un réseau physique, avant que de le simuler. Réciproquement, il serait peut-être intéressant d'envisager d'avoir recours à des algorithmes physiques pour structurer les processus de mutation/sélection des algorithmes génétiques (mutation par simulation physique), quel que soit le domaine sur lequel ils sont appliqués.

³⁹ Projet interne MSCI-M, initié en 2012 et planifié sur quelques années, groupe de travail J Léonard, C Cadoz, N Castagné, JL Florens, A Luciani. Ce projet s'organise en lien direct avec les travaux de thèse de James Leonard, Ecole doctorale EDISCE, début de la thèse : 1^{er} octobre 2012, co-direction C Cadoz, N Castagné.

fait important eu égard à mes motivations personnelles, telles qu'exposées dans le préambule, puis tout au long de ce mémoire, et eu égard aux perspectives que j'espère développer à l'avenir dans mes travaux de recherche.

Au delà d'un simple arrimage de briques technologiques existantes, le projet adresse plusieurs défis technologiques et scientifiques :

- réalisation d'une nouvelle architecture matérielle et logicielle pour la simulation décuplant la puissance de calcul temps réel synchrone aujourd'hui disponible ;
- étude et mise en place d'un squelette de calcul multi-fréquence synchrone dans le but de pouvoir adapter les fréquences de simulation les parties d'un modèle complet aux plages fréquentielles de leur propriétés comportementales (parties « compositionnelles » basse fréquence ; parties « gestuelles » ; parties « acoustiques ») ;
- capacité à enregistrer, puis à rejouer, la trace complète d'une performance instrumentale ;
- réalisation d'un modèleur dédié qui incorpore les fonctionnalités nouvelles nécessaires à la modélisation de l'interaction instrumentale (maîtrise par le modélisateur des points de vue relatifs par lesquels le modèle et l'instrumentiste sont mis en interaction au travers du système à retour d'effort) et du multifréquence ;
- étude et développement d'un savoir-faire relatif à la modélisation pour l'interaction instrumentale musicale.

Il s'inscrit en outre dans certaines préoccupations de plusieurs communautés scientifiques. Ainsi, par exemple :

- dans le domaine de l'informatique musicale, il s'agit d'apporter la preuve expérimentale de la pertinence des analyses du groupe en ce qui concerne la situation instrumentale et, notamment, l'importance de la fonction ergotique du geste.
- Dans le domaine de l'haptique et du retour d'effort, il s'agit d'abord de contribuer à la démonstration de la nécessité du retour d'effort pour certaines applications sonores et musicales, dans un contexte où les tentatives sont encore peu nombreuses et parfois peu convaincantes.
- Dans le domaine des réalités virtuelles, il s'agit de positionner la pertinence de réalités virtuelles sonores et musicales, qui s'intéressent prioritairement aux boucles geste-retour sonore [Leonard et al.14_#].

Informatique graphique : perspectives de travaux autour de l'environnement MIMESIS

MIMESIS : environnements et processus de modélisation pour l'image

Cet axe poursuit les travaux rapportés dans les chapitres 3 et 4.

En ce qui concerne l'environnement MIMESIS pour la création de mouvement et l'image animée, il est tout d'abord essentiel que la nouvelle version de MIMESIS attendue pour fin 2014 soit mise en test, confrontée aux usages, disséminée et valorisée, puis qu'elle entre dans les cycles usage/modification qui permettront de l'amener à maturité. On pourra ensuite, dans une perspective à plus long terme, poser les jalons de recherches futures – comme nous l'avons proposé ci-dessus pour GENESIS.

Tout comme pour GENESIS, la question se pose d'un changement d'échelle dans la complexité des modèles réalisés avec MIMESIS pour l'image animée. A ce sujet, signalons que certaines des pistes que nous avons pu ébaucher et rapporter dans ce mémoire (système de labellisation, multimodalité graphique/textuelle, éditeurs évolués de paramètre...), seront sans doute communes aux deux environnements logiciels et pourront être étudiées en synergie – poursuivant ainsi la dynamique de travail commun sur le thème des environnements de modélisation initiée à l'occasion de la *Physics Network Suit* à partir de 2005.

D'autres questions demeurent par contre spécifiques à l'image.

Il conviendrait d'abord de continuer à œuvrer à des évolutions du cadre formel, CORDIS-ANIMA, pour y intégrer de nouvelles fonctionnalités servant les besoins de l'image animée, dans la continuité des travaux sur les « MAT-Eclatables », section 5.2.

On pense ici également, par exemple, aux fonctionnalités dédiées à l'édition des conditions initiales des modèles : on sait en effet la sensibilité aux conditions initiales des systèmes dynamiques que sont les modèles CORDIS-ANIMA, et combien il est délicat d'éditer finement, individuellement, l'état initial d'un très grand nombre de modules tridimensionnels.

L'aval de la simulation : technologies pour la mise en image du mouvement

Cet axe poursuit les travaux rapportés dans la section 3.4.

Le second chantier majeur que nous identifions pour nos futures contributions en Informatique Graphique est relatif à l'aval de la simulation, c'est-à-dire aux technologies pour la mise en forme du mouvement. On s'inscrit ici pleinement dans le processus général « modélisation des causes du mouvement » puis « mise en forme du mouvement généré », tel que proposé par A. Luciani.

Un principe général retenu par l'équipe image du groupe est que plusieurs procédés de mise en forme doivent à terme pouvoir être proposés au choix et mis à profit pour visualiser un mouvement. A ce jour les procédés peuvent être classés en trois groupes :

- les procédés basés sur l'émergence de la forme : le procédé de « gravure dynamique », porté par le groupe ; les surfaces implicites, etc.
- les procédés d'affectation de formes libres contrôlées par les points en mouvement : système MIMESIS-Forme porté par le groupe, systèmes de type « *bloc diagram* » dans lequel les « signaux de mouvement » sont progressivement traités, jusqu'au contrôle d'algorithmes de rendu 3D.
- les procédés, tout à fait nouveaux, de modélisation explicite de formes très structurées, dont la topologie est susceptible d'être transformée de façon profonde tout au long de l'animation et qui sont basés sur des pipelines de mise en forme topo-géométriques évolutifs – procédés et logiciel MORPHO-Map, projet DYNAMÉ.

Dans ce contexte, compte tenu de mes savoir-faire et de mes contributions passées, plutôt que de chercher à développer une expertise poussée dans les domaines scientifiques adressés, tels que la topologie ou la géométrie algorithmique, j'ai l'espoir de pouvoir apporter ma contribution au moyen de deux dynamiques complémentaires :

- celle qui viserait à ce que ces divers procédés, ainsi que d'autres le cas échéant, soient organisés entre eux de telle sorte que l'ensemble « fasse système » dans le cadre général d'un ensemble de technologies pour la mise en forme du mouvement visuel généré par réseaux physiques.
- celle qui consisterait, pour chacun d'eux, à veiller continuellement à ce qu'on conserve en point de mire la réalisation de systèmes logiciels génériques et dotés des ergonomies adéquates, et donc à œuvrer en ce sens au « portage aux usages ».

Contributions à une nouvelle phase de formalisation du système CORDIS-ANIMA

Axe en lien avec nos contributions rapportées au chapitre 5.

Langage modulaire, système de représentation et ensemble d'algorithmes, CORDIS-ANIMA constitue une expression axiomatique et une formulation algorithmique précise du principe des réseaux physiques masses-interactions. Il a la capacité de structurer les algorithmes de simulation physique et les logiciels de simulation, mais aussi les activités de modélisation et les environnements de modélisation et de création. Il est ainsi à la fois l'un des résultats essentiels du groupe et un cadre formel fondateur pour d'autres travaux.

Comme tout système, CORDIS-ANIMA a rencontré au cours de son évolution des phases de spécification formelle et des phases d'implantation, de modélisation et d'expérimentation. Nous

avons déjà évoqué les trois moments clé qui ont marqué l'histoire du formalisme : version initiale de 1981 [Cadoz.79], extension aux modèles tridimensionnels pour l'image [Luciani.85], version publiée au début des années 90 [Cadoz et al.90a] [Cadoz et al.93], versions « temps réel » (1990-...). Près de 30 années après l'introduction du formalisme et de 20 années après sa première publication, une nouvelle phase de formalisation d'importance, à laquelle je suis associé, a été initiée en 2010. Ce travail est planifié pour plusieurs années et actuellement coordonné par A Luciani. Il s'agit d'étendre la version de 1991 du formalisme suivant plusieurs dimensions essentielles.

Il nous semble intéressant d'évoquer ici deux des éléments méthodologiques qui structurent ce travail, en ce que d'une part nous les pensons originaux et que d'autre part ils renvoient aux deux « recadrages » que nous défendions dans la section précédente. Tout d'abord, ce travail est conduit en considérant conjointement les besoins « de l'oreille » (informatique musicale), « de l'œil » (informatique graphique), « du « geste » (haptique...) et plus généralement la visée de l'instrumentalité et de la multisensorialité. Il s'agit donc de considérer, dans l'édification des évolutions du formalisme, toutes les cultures scientifiques et artistiques qu'il peut concerner et tous les usages qu'il est aujourd'hui possible d'envisager. Ensuite, ce travail est volontairement conduit en considérant de concert la problématique de la simulation et celle de la modélisation, afin que CORDIS-ANIMA demeure à la fois un langage de modélisation *et* un système de simulation. Ce double équilibre, rappelons-le, correspond à un double recadrage dans les usages observables en recherche aujourd'hui.

En ce qui me concerne plus directement, mon apport à ce travail pourra se jouer surtout sous l'angle des technologies logicielles. Mon regard se porte ainsi en particulier sur les implantations possibles du formalisme dans des moteurs de simulation (par exemple par une analyse de la portabilité, de la complexité algorithmique et de la stabilité du coût computationnel) ainsi que sur le fait de veiller à ce que le cœur du cadre formel conserve la capacité à fonder et structurer les environnements logiciels futurs – de la même manière que GENESIS et MIMESIS ont été conçus, d'une certaine manière, pour permettre l'appropriation et la pratique de la version de CORDIS-ANIMA de 1992, tirant partie de son aptitude intrinsèque à supporter la modélisation.

Les évolutions formelles de CORDIS-ANIMA visées par cette étude sont multiples ; nous n'évoquerons que quelques-unes d'entre elles.

Schéma de calcul multifréquence et modèles multifréquence

Cette perspective prend la suite de prototypes antérieurs, étudiés par J.L. Florens et C. Cadoz. Elle est actuellement étudiée dans le cadre du projet MSCI et de la thèse de J. Leonard. L'objectif est ici de permettre que les diverses parties d'un modèle complet soient calculées à des fréquences de simulation différentes, chacune étant adaptée aux propriétés fréquentielles des phénomènes que sa partie modélise. Est en jeu ici avant tout un principe d'économie et d'adaptation optimale de la complexité des calculs de simulation au comportement visé. Il s'agit alors de parvenir à formaliser un squelette de calcul multifréquences qui garantisse notamment le synchronisme des calculs nécessaire au respect de la cohérence énergétique du modèle complet. Il s'agit de plus d'étudier et traiter de façon appropriée les frontières inter-fréquence. Il s'agit enfin de spécifier formellement la manière dont sera exprimé un modèle multifréquence.

Multiprocesseur

En s'appuyant sur des prototypes et des propositions formulées par le passé (dont [Muniz.02]), l'objectif est de parvenir à une définition formelle de la façon dont le calcul d'un modèle CORDIS-ANIMA pourra être réparti sur plusieurs unités de calcul – machine multiprocesseur, co-processeurs dédiés DSP, co-processeur graphique ou autre. Dans ce cadre, il s'agit d'exprimer un squelette multi-processeur optimal (notamment en ce qui concerne les flux échangés entre processeurs) qui respecte le synchronisme global du calcul. Du côté du support à l'activité de modélisation, il s'agit notamment d'étudier les moyens formels qui permettront d'exprimer la répartition d'un modèle sur plusieurs processeurs.

Multiéchelle et multirésolution ; des problèmes du calcul flottant

Certains modèles CORDIS-ANIMA nécessitent que diverses parties du modèle adoptent des comportements d'échelles très différentes. Pour ne donner qu'un exemple, il peut être nécessaire que dans un même modèle les plages de valeurs des positions des <MAT> puissent varier dans un ordre de grandeur de l'ordre de 10^{10} - 40 . Qui plus est, il peut être nécessaire que des comportements dynamiques de petite échelle soient calculés autour de valeurs médianes importantes⁴¹. Enfin, il faut que ces différentes parties du modèle, d'échelle très différentes, puissent être mises en interaction physique cohérente. Nous regroupons ces divers besoins sous les vocables de *multiéchelle* et de *multirésolution*.

Les formulations actuelles des algorithmes CORDIS-ANIMA s'appuient sur les normes du calcul à virgule flottante. C'est là un choix parfaitement justifié, ne serait-ce que compte tenu des impératifs d'optimalité pour le calcul temps réel dur synchrone et des grandes plages de valeurs nécessaires. Mais, à l'inverse, on sait combien l'arithmétique à virgule flottante est problématique eu égard aux problèmes posés par les correspondances dans le multiéchelle et la multirésolution⁴².

Nous posons alors la question de l'étude de possibles nouvelles formulations de l'algorithmique CORDIS-ANIMA qui répondraient aux besoins et aux problèmes du multiéchelle et de la multirésolution. Cette problématique relève des domaines de l'analyse et du calcul numérique. Des solutions originales devront être recherchées. Il pourrait s'agir d'étudier une possible formulation des algorithmes au moyen d'une arithmétique à virgule fixe (par exemple au moyen de l'arithmétique entière) ou encore envisager de représenter les variables d'état au moyen de deux composantes (l'une, à virgule fixe, qui correspondrait à un positionnement global, l'autre, à virgule flottante, qui permettrait la représentation des variations locales).

Multidimensionalité et couplages multi-dimensionnels

Nous avons déjà vu que CORDIS-ANIMA permet de prendre en compte le fait que les phénomènes dynamiques modélisés peuvent être de dimension quelconque. Cette question de la dimensionnalité des phénomènes dynamiques est aujourd'hui adressée par l'existence de variantes du formalisme et de ses algorithmes, au travers de la dimension des variables d'état et des points de communication des modules [Cadoz et al.93]. Ainsi, par exemple, nous avons indiqué que GENESIS utilise la version unidimensionnelle du formalisme, et MIMESIS la version tridimensionnelle.

Tout en posant le principe, les précédentes phase de formalisation n'ont pas précisé les moyens formels et algorithmiques qui doivent permettre un couplage inter-dimensionnel. Plusieurs études expérimentales ont été réalisées (JL Florens, A Luciani, O Tache...) et ont permis de proposer plusieurs pistes pour ce couplage inter-dimensionnel. Il s'agit donc, désormais, de revisiter ces travaux pour intégrer au formalisme les moyens conceptuels et algorithmiques permettant la modélisation, et le calcul, de tels couplages inter-dimensionnels.

⁴⁰ Par exemple : nm pour des parties de modèles d'échelle nanométrique ; μ m ou du mm pour des structures vibrantes sonores ; cm ou m pour les parties de modèle à échelle du geste humain ; au km, ou bien plus, pour certaines parties de modèle tridimensionnelles (modèles de systèmes planétaires, etc.).

⁴¹ C'est le cas par exemple lorsqu'on a besoin que la position d'équilibre d'une structure vibrante soit éloignée de zéro (*e.g.* structures vibrantes sonores « flottantes »), ou bien plus simplement lorsqu'on veut modéliser un oscillateur physique élémentaire dont le point fixe est situé loin de l'origine de l'espace.

⁴² A titre d'exemple, le choix du calcul à virgule flottante implique que deux modèles oscillants *identiques* mais placés à deux endroits différents de l'espace de simulation n'adopteront pas exactement le même comportement. Plus généralement, les difficultés inhérentes à l'arithmétique flottante sont bien sûr connues dans les domaines du calcul numérique et de la simulation. Incidemment, signalons qu'un autre problème inhérent au calcul flottant est lié à la portabilité, en ce sens que les normes flottantes ne sont pas toujours garanties par les processeurs et compilateurs.

Modules fonctionnels. Contrôle dynamique de paramètres et de structure, etc.

Cet axe vise une spécification formelle d'un ensemble complet de nouveaux modules dits « fonctionnels », dont l'algorithme ne correspond pas à une loi physique. Les modules fonctionnels avaient été identifiés comme nécessaires dès l'origine de CORDIS-ANIMA, mais n'ont jusqu'ici pu être abordés qu'au cas par cas, sans le niveau de généralité et de précision formelle requis. Notons que l'étude de la fonctionnalité « MAT-Eclatable » (section 5.2) constitue un exemple de contribution à ce travail, qu'il s'agit à l'avenir de généraliser et standardiser.

Envisagée sous l'angle des nécessités de la modélisation et de la cohérence formelle, les modules fonctionnels pourront conduire à modifier plusieurs aspects de CORDIS-ANIMA, par exemple en introduisant de nouvelles catégories de variables d'état « fonctionnelles » en sus des variables duales *force* et *position*. Envisagée sous l'angle de la simulation et des simulateurs, deux aspects de l'étude concernent d'une part les modifications des structures de données des simulateurs nécessaires au support des nouvelles fonctionnalités et d'autre part l'insertion de l'exécution des algorithmes de ces nouveaux modules fonctionnels dans le squelette temporel synchrone.

Ouverture à d'autres formalismes :

Enfin, le dernier axe du nouvel effort de formalisation de CORDIS-ANIMA que nous citerons ici vise à préciser, au niveau formel, les moyens de la collaboration du formalisme des réseaux physiques avec d'autres formalismes non physiques, notamment dans les domaines des réalités virtuelles, de l'animation de la synthèse de son, etc. Par exemple : collaboration avec des modèles de signaux, collaboration avec des modèles topologiques ou d'informatique graphique pour avancer sur la question de l'habillage visuel des modèles CORDIS-ANIMA, etc.

Architectures matérielles et logicielles pour le calcul temps réel dur synchrone des réseaux physiques multisensoriels

Axe en lien avec nos travaux exposés en 6.1 et 6.2.

Nous formulons le projet de poursuivre notre contribution à l'étude et à la réalisation des futures plateformes informatiques de simulation multisensorielle. La mise en contexte de cet axe de recherches a été exposée à la section 6.1.

Cette axe concerne tout d'abord l'architecture matérielle des machines supportant le calcul de simulation multisensorielle. Rappelons que, dans ce contexte, une des problématiques dominantes est celle de la cohabitation d'une puissance de calcul importante avec les exigences de capacités de calcul temps réel synchrone critiques, situées parmi les plus hauts niveaux du domaine. On s'intéressera aux calculateurs eux mêmes, incluant les services élémentaires fournis par le système d'exploitation, ainsi qu'à l'étude des co-processeurs qui environneront le calculateur (co-processeurs « audio » et « graphique » bien sûr, mais aussi co-processeur « gestuel » [Courousse.07] [Luciani et al.14c.#]). Deux directions d'étude nous semblent importantes pour le futur des « calculateurs multisensoriels » :

- La poursuite de la veille technologique et scientifique dans l'objectif de construire de nouvelles plateformes de calcul « haut de gamme », à même de servir les besoins futurs les plus exigeants de la recherche, de l'expérimentation et de la création. Dans ce contexte, nous envisageons de contribuer en poursuivant notre étude des systèmes d'exploitation dits « temps réel » pouvant équiper des serveurs de calcul x86. Par ailleurs, à titre d'exemple, une possibilité qui nous semble intéressante à questionner est celle des nouvelles architectures de calcul à très grand nombre de cœur, de type *multiprocessor System-on-Chip (MPSoC)*.
- La poursuite de l'effort visant à décliner les principes de la simulation multisensorielle instrumentale sur une gamme élargie de machines. On visera ici notamment à ce que les plateformes informatiques d'usage tout à fait courant (ordinateurs personnels par exemple) puissent être dotées de capacités de simulation multisensorielle synchrone, incluant les impératifs de la transduction.

En ce qui concerne maintenant les architectures logicielles de simulation, qui sont plus spécifiquement dans mon domaine de compétence scientifique, j'ai le projet de participer aux travaux visant la réalisation d'un nouveau moteur de simulation temps réel synchrone : interface de programmation, structure de donnée, squelette temporel. Ces travaux ayant trait à l'informatique embarquée et temps réel pourront notamment viser :

- La définition et l'implémentation d'une architecture logicielle de simulation garantissant la simulation stable et robuste des réseaux physiques CORDIS-ANIMA : représentation des nombres, déterminisme des calculs, implantation des squelettes de calcul avancés, multifréquences, multisensoriels et comportant des algorithmes à la fois physiques et fonctionnels.
- La portabilité de cette architecture, c'est à dire la possibilité de son déploiement dans des configurations matérielles diverses.
- L'adjonction au cœur du moteur temps réel de fonctionnalités annexes au calcul physique proprement dit : exportation de variables de flux vers des processus avals (tels que les processus de mise en forme visuelle), enregistrement simultané de la grande quantité de données résultant de la simulation pour une analyse ou une réutilisation ultérieure, etc.

Signaux de geste et de mouvement ; analyse, traitement et édition du signal gestuel

Cet axe s'appuie sur notre contribution au format GMS, section 3.3.

Les signaux gestuels et de mouvement ont ceci d'intéressant qu'ils peuvent agir comme un lien entre domaines d'application et comme un lien entre dispositifs de diverses natures. Pour permettre le développement de ce rôle, il est aujourd'hui important de déterminer les conditions et moyens de leur analyse, de leur traitement et de leur édition. Or, la question est très ouverte, les signaux gestuels étant encore méconnus.

L'analyse et le traitement du geste – ou, plus précisément, des signaux gestuels ou « traces gestuelles », c'est-à-dire des signaux captés en situation d'interaction multisensorielle avec retour d'effort – ont été plusieurs fois abordés au sein du laboratoire. En particulier, les thèses de Christophe Ramstein [Cadoz&Ramstein.90] [Ramstein.91] et Sylvie Gibet [Gibet.87] leur étaient consacrées. Plus récemment, nous avons proposé un nouveau format, le format GMS (Gesture and Motion Signal, section 3.3) pour structurer et encoder, à bas niveau, ce type de signaux. Dans ce contexte, j'ai désormais pour projet de participer à la réouverture des recherches sur l'analyse et le traitement de ces signaux gestuels.

Il s'agirait de définir les principes et algorithmes de l'analyse, du traitement et de l'édition de ces signaux gestuels, en particulier dans le cas où ils sont la trace d'une interaction ergotique. Il s'agirait en outre de spécifier les opérations d'édition (représentation, analyse, extraction de caractéristiques objectives et caractères plus abstraits, traitement modification, montage...) qui peuvent leur être appliqué de façon pertinente, entendons : sans nuire à la signification qu'ils encodent profondément, par exemple sans détruire leur portée musicale et leur caractère de trace objective d'une interaction ergotique. Il s'agirait également, dans la poursuite des travaux antérieurs, de questionner la façon dont, partant de ces signaux, il serait possible d'en déduire par l'analyse des informations sur les conditions dans lesquelles l'interaction gestuelle qu'ils signent a été opérée : information sur le corps physique virtuel avec lequel le sujet interagissait, ou information sur le fonctionnement et l'état de l'appareil sensori-moteur gestuel du sujet par exemple. Il s'agirait enfin, pour ce qui me concerne plus directement, de poser les bases d'une nouvelle catégorie de logiciels dédiés à l'analyse, au traitement et à l'édition des signaux gestuels.

Ces recherches pourront peut-être être conduite en collaboration avec des chercheurs en sciences cognitives. En effet, de la même manière que l'arrivée des outils de synthèse de sons a participé à l'essor de la psychoacoustique, l'existence d'une plate-forme de réalité virtuelle multisensorielle intégrant des transducteurs gestuels à retour d'effort performants permet

d'envisager une étude psycho-cognitive de la modalité haptique et du geste instrumental. Peu de travaux existent à ce jour dans le domaine, et l'apparition de nouvelles modalités d'interaction homme/machine rend possible, mais aussi nécessaire, l'étude de ces couplages sensori-moteurs.

Un environnement de modélisation et de simulation pour les processus de la création multisensorielle instrumentale

Cet axe étend et renouvelle nos travaux présentés dans les chapitres 2, 3 et 4.

Nous en arrivons, pour finir, à formuler le projet d'ouvrir l'axe nouveau des environnements logiciels pour la création multisensorielle instrumentale, basée sur la modélisation et la simulation avec les réseaux physiques.

Dans le contexte de l'interaction multisensorielle, tout comme dans le contexte de la création graphique ou sonore, la question de l'environnement de modélisation et de simulation nous semble fondamentale. En effet, « disposer d'outils de conception adaptés est ici non seulement une commodité permettant à l'utilisateur de travailler aisément, mais, plus fondamentalement, une nécessité pour développer un profil de compétence, stable et partageable, en "génie empirique en modélisation physique particulière" pour la multisensorialité instrumentale [RapActQuad.10].

Mes travaux au sein du groupe ICA-ACROE sur la question des environnements de modélisation, tous domaines applicatifs confondus, me mettent en situation de pouvoir participer très activement à cet axe de recherche. De fait, il pourra en effet bénéficier des connaissances acquises, des éléments méthodologiques mis en place et des résultats de nos travaux relatifs aux environnements GENESIS et MIMESIS et à la *Physics Networks Suit* (chapitres 2 3 et 4) et relatifs aux travaux en cours du projet MSCi (section 6.2). Toutefois, ce sont bien des questions nouvelles, et très ouvertes, tant dans le cadre du programme du groupe que sur le plan international des domaines scientifiques et artistiques connexes, qu'il nous faudra ici identifier, puis adresser.

Il s'agira en effet d'accompagner l'invention, l'expérimentation et la caractérisation de processus de création nouveaux, que l'on pourrait qualifier de « multisensoriels instrumentaux ».

Il s'agira en outre, pour ce qui nous concerne plus directement, de fonder les catégories d'environnements logiciels supportant ces processus de création – de fonder de nouveaux « paradigmes d'environnement logiciel », pour reprendre les termes utilisés dans le cadre de ce mémoire. Il nous faudra identifier, puis concevoir, ce que peut et doit être une technologie logicielle de modélisation/simulation physique pour la création.

Nous distinguons ici deux perspectives de travail essentielles.

Tout d'abord, l'environnement logiciel aura entre autre pour fonction *d'intégrer les problématiques de la modélisation et de la simulation temps réel*. Il s'agit déjà, bien sûr, que l'environnement permette à l'utilisateur de « jouer instrumentalement » avec le modèle qu'il a conçu – et pour cela que le simulateur temps réel soit intégré à l'environnement et que le modéleur dispose des fonctionnalités permettant de spécifier les conditions du jeu instrumental. Au delà, l'environnement devra permettre la co-organisation de l'activité de modélisation (hors-temps) et du jeu instrumental (en-temps). Nous pensons ici bien sûr à la possibilité de juxtaposer modélisation et simulation (concevoir un instrument, puis en jouer). Mais nous pensons également à des modes plus complexes, tels que le fait de pouvoir réintroduire dans un macro-modèle les résultats d'une performance instrumentale antérieure, de pouvoir juxtaposer dans un modèle complet des parties de très grande taille, nécessairement « non temps réel », et des parties jouées instrumentalement, etc. Nous adressons ainsi, plus généralement, la possibilité d'une « composition de l'instrumentalité » ou d'une « composition de la multisensorialité » qui ait recours aux possibilités du jeu instrumental.

Ensuite, au delà de la réalisation de modèles adressant une modalité sensorielle particulière (et, ce faisant, adressant une forme d'expression artistique unique), il s'agira d'adresser la

problématique nouvelle de l'environnement de modélisation multisensorielle supportant la réalisation de modèles générant intrinsèquement des phénomènes multisensoriels. La diversité des modèles envisageables et les évolutions formelles de CORDIS-ANIMA projetées devront être considérées. Par exemple : modèles d'objets dynamiques visibles, sonores, tactiles et/ou manipulables, multi-échelle, multifréquence et/ou multidimensionnels, pouvant être de très grande taille, temps réel ou non, pouvant être répartis sur plusieurs unités de calcul, etc.

Incidemment, il apparaît, à l'examen de cet axe, que mes contributions passées dans les divers compartiments du groupe, autres que de disperser mes efforts, sont en réalité des nécessités m'offrant les contacts approfondis nécessaires pour mener à bien la construction de cet environnement, dans la mesure où celui-ci adresse, dans une sorte de synthèse, toutes ces « disciplines ».

Enfin, en ouvrant cet axe de recherche technologique sous le vocable « environnement pour la création multisensorielle instrumentale », nous avons bien sûr l'ambition de contribuer au travers de notre démarche de « démonstration par l'outil », à la fondation durable de nouveaux principes pour la situation d'interaction avec les artefacts numériques, basée sur la notion de multisensorialité instrumentale.

Dans le contexte de la création artistique, nous espérons ainsi, et en conclusion, accompagner la fondation de nouvelles « écoles » de création numérique, l'élaboration de nouveaux savoir-faire, et la découverte de nouvelles formes d'art – un art numérique qui serait multisensoriel, et instrumental.

8 Annexes

8.1 Références citées

- [Allaoui.10] Introduction de processus de conception pour la modélisation interactive de modèles physiques particuliers 3D complexes dans l'environnement MIMESIS. Thèse de doctorat en Ingénierie de l'interaction, de la cognition, de l'apprentissage et de la création (IC2A), école doctorale EDISCE, Université de Grenoble. Dirigée par Claude Cadoz et Annie Luciani. Soutenue le 21 octobre 2010.
- [AST.98] Rapport de mission du ministère de l'Education Nationale « Art-Science-Technologie » – sous la direction de Jean-Claude Risset – 1998.
- [Beaudouin.00] Beaudouin-Lafon, M : Instrumental interaction: an interaction model for designing post-WIMP user interfaces. In Proc. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2000). ACM, pages 446-453.
- [Berdahl et al.09a] “Using Haptics to Assist Performers in Making Gestures to a Musical Instrument”, E. Berdahl, G. Niemeyer, J.O. Smith, NIME09, Pittsburgh, PA, June 4-6, p 177-182.
- [Berdahl et al.09b] “Using Haptic Devices to Interface Directly with Digital Waveguide Based Musical Instruments”, E. Berdahl, G. Niemeyer, J.O. Smith, NIME09, p 177-182.
- [Berdahl et al.12_#] Edgar Berdahl, Claude Cadoz and Nicolas Castagné : "Force-feedback interaction with a neural oscillator model: for shared human-robot control of a virtual percussion instrument", EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing 2012, 2012:9 doi:10.1186/1687-4722-2012-9 – 46 pages.
- [Berdahl et al.12_#] Edgar Berdahl, Claude Cadoz and Nicolas Castagné : "Force-feedback interaction with a neural oscillator model: for shared human-robot control of a virtual percussion instrument", EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing 2012, 2012:9 doi:10.1186/1687-4722-2012-9 – 46 pages.
- [Cadoz.02a] Cadoz C : The Physical Model as a Metaphor for Musical Creation – ICMC'02 proceedings – Sweden 2002.
- [Cadoz.07] Claude Cadoz : Interface, ergotic. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.
- [Cadoz.11] Cadoz, C : Instrumentalité, écriture, technologie numérique : une dynamique supra-instrumentale et méta-scriptique du processus de création musical. Dans Créativité instrumentale et créativité ambiante. Ouvrage coordonné par Annie Luciani, Olivier Tache et Nicolas Castagné. ACROE/Enactive Systems Books publisher, 2011 – ISBN 978-2-9530856-1-7 - 4ième Trm 2012. pp91-146. Reprint du site web <http://aiculture/eu>, 2011 (accédé décembre 2013)
- [Cadoz.79] Cadoz C : Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires, application aux sons musicaux – Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble -1979.
- [Cadoz.90a] Cadoz C : Simuler pour connaître, Connaître pour simuler – Actes du Colloque Modèles Physiques, Création Musicale et Ordinateurs – organisé par l'ACROE, Grenoble 1990 – Edition de la Maison des Sciences de l'Homme – Paris, 1994.
- [Cadoz.93] Cadoz, C : Le geste canal de communication homme/machine la communication "instrumentale", Texte pour les Entretiens de Lyon – 92. Non publié pour cause d'annulation du congrès. Disponible dans les archives ACROE-ICA. Remanié dans [Cadoz.94].
- [Cadoz.94] Cadoz C : Le geste, canal de communication homme/machine. La communication instrumentale – Technique et science de l'information. – Volume 13 - n° 1, pages 31-61 – 1994. Disponible en ligne <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00867517/>
- [Cadoz.99a] Cadoz C : Continuum énergétique du geste au son – in Interfaces homme-machine et création musicale – sous la direction de H Vinet et F Delalande – Hermès, 1999.
- [Cadoz.99b] Cadoz C : Musique, gestes, technologie – in les nouveaux gestes de la musique – sous la direction de H Genevois et R de Vivo – Ed. Parenthèses, coll Eupalinos - Marseille, 1999.
- [Cadoz et al.03b_#] Cadoz C, Luciani A, Florens JL, Castagné N: Artistic Creation and Computer Interactive Multisensory Force Feedback Gesture Transducers – invited position paper - Proceedings of the

- Conference on New instruments for Musical Expression (NIME-03), Montreal, Canada, 2003/05/21-25, pp 235-249.
- [Cadoz et al.11] Claude Cadoz, Nicolas Castagné, Olivier Tache. Sound synthesis and musical composition with physical modeling formalism CORDIS-ANIMA. 162nd Meeting Acoustical Society of America. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 130 ; n° 4, Pt 2, October 2011. pp 2365.
- [Cadoz et al.11_#] Claude Cadoz, Nicolas Castagné, Olivier Tache. Sound synthesis and musical composition with physical modeling formalism CORDIS-ANIMA. 162nd Meeting Acoustical Society of America. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 130 ; n° 4, Pt 2, October 2011. pp 2365:2365.
- [Cadoz et al.81] Cadoz C, Luciani A, Florens JL : Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux, transducteurs gestuels rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental – Revue d'Acoustique, vol. 59, pp. 279-292, 1981
- [Cadoz et al.84] Cadoz C, Luciani A, Florens JL : Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms : The Cordis System – CMJ vol 8/2, pp. 60-73 – MIT Press 1984. Reprint in “The Music Machine” – edited by Curtis Roads – The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England - pp. 495 508 – 1988.
- [Cadoz et al.90a] Cadoz C, Luciani A, Florens JL : CORDIS ANIMA : Système de modélisation et de simulation d'instruments et d'objets physiques pour la création musicale et l'image animée – Actes du Colloque Modèles Physiques, Création Musicale et Ordinateurs – organisé par l'ACROE, Grenoble 1990 – Edition de la Maison des Sciences de l'Homme – Paris, 1994.
- [Cadoz et al.90b] Cadoz C, Lisowski L, Florens JL : A Modular Feedback Keyboard Design – CMJ vol. 14/2, pp. 47-51 – MIT Press 1990.
- [Cadoz et al.93] Cadoz C, Luciani A, Florens JL : CORDIS-ANIMA : a Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis: The General Formalism – CMJ vol 17/1 – MIT Press 1993.
- [Cadoz&Florens.78a] Cadoz C., Florens J-L. Fondements d'une démarche de recherche informatique/musique - Revue d'Acoustique N°45, pp. 86-101. Paris 1978.
- [Cadoz&Florens 78b] Cadoz C., Florens J-L. Cellule de recherche sur la synthèse musicale par ordinateur » Rapport du LCP. 1978.
- [Cadoz&Ramstein.90] Cadoz C, Ramstein C : “Capture, Representation and Composition of the Instrumental Gesture” – Proceedings of the International Computer Music Conference 1990. Pages: 53-56 – Glasgow 1990.
- [Castagné.02-thèse_#] Castagné N :GENESIS, un environnement pour la création musicale à l'aide de modèles physiques particuliers – mémoire de Thèse d'Informatique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, spécialité Acoustique, Traitement du signal et Informatique Appliqués à la Musique (ATIAM), sous la direction de Claude Cadoz – octobre 2002.
- [Castagné.02-thèse_#] Castagné N :GENESIS, un environnement pour la création musicale à l'aide de modèles physiques particuliers – mémoire de Thèse d'Informatique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, spécialité Acoustique, Traitement du signal et Informatique Appliqués à la Musique (ATIAM), sous la direction de Claude Cadoz – octobre 2002.
- [Castagné.07a_#] Nicolas Castagné : Mapping and control vs. instrumental interaction. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0 pp189-190.
- [Castagné.07b_#] Nicolas Castagné : Physically-based modelling. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0 pp237-238.
- [Castagné.07c_#] Nicolas Castagné : Physically-based modelling techniques. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0 pp238-240.
- [Castagné.07d_#] Nicolas Castagné : Physically-based modelling techniques for multisensory simulation. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0 pp242-244
- [Castagné.07e_#] Nicolas Castagné : Physically-based modelling techniques for sound synthesis. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0 pp244-245.
- [Castagné.12_#] Nicolas Castagné: compte rendu de la mission “SIGGRAPH 2012” de l'Association Française d'Informatique Graphique et du GRD-IG. Présenté lors des journées AFIG 2012, 21/23 nov 2012. Transparents disponible en ligne Compte rendu journalier durant la conférence disponible “en ligne” :

https://zimbra.imag.fr/home/nicolas.Castagné@imag.fr/partagepublic/AFIG_SIGGRAPH_101121h_VF.pdf
. Blog « Siggraph 2012 On The Spot » : <http://afig.siggraph2012.overblog.com/> 2011 (accédé décembre 2013)

- [Castagné.96_#] Castagné N : Une exploration des potentialités de la bidimensionnalité dans les modèles CORDIS de structures vibrantes - le filament 2D – Rapport de stage de DEA Acoustique, Traitement du signal et Informatique Appliqués à la Musique (ATIAM) – et d'Ingénieur de l'Ecole Centrale Paris – ACROE - juillet 96.
- [Castagné et al.04_#] Castagné N, Cadoz C, Florens JL, Luciani A. : Haptics in Computer Music: a Paradigm Shift – Short Paper – proceedings of the International Conference EUROHAPTICS, Munich, Germany, 2004, pp422-426.
- [Castagné et al.05_#] Nicolas Castagné, Jean-Loup Florens & Annie Luciani: “Computer Platforms for Hard-Real Time and High Quality Ergotic Multisensory Systems - requirements, theoretical overview, benches” - Proceedings of ENACTIVE05, 2nd International Conference on Enactive Interfaces, Genoa, Italy, November 17th-18th, 2005 – 4 pages, Cdrom.
- [Castagné et al.07_#] Nicolas Castagné, Emilio Sánchez, Ronan Boulic, and Jorge Juan Gil : Interface. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0 pp158-161.
- [Castagné et al.09_#] Nicolas Castagné, Claude Cadoz, Ali Allaoui, Olivier Tache: « G3: GENESIS Software Environment Update » - proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC'09) – Montreal, Canada, August 2009 – pp407-410 - ISBN 0-9713192-7-8.
- [Castagné&Cadoz.00_#] Castagné N, Cadoz C : Physical Modeling Synthesis : balance between realism and computing speed – COST-G6 Conference on Digital Audio Effects (DAFx-00) proceedings – Veronne, Italy, December 2000 (6 pages).
- [Castagné&Cadoz.02a_#] Castagné N, Cadoz C : GENESIS: A Friendly Musician-Oriented Environment for Mass-Interaction Physical Modeling – International Computer Music Conference (ICMC'02) proceedings – Sweden, 2002 – pp pp330-337.
- [Castagné&Cadoz.02b_#] Castagné N, Cadoz C : Creating Music by Means of "Physical Thinking": The Musician Oriented Genesis Environment – COST-G6 Conference on Digital Audio Effects (DAFx-02) proceedings – Germany, September 02, pp169-174.
- [Castagné&Cadoz.02c_#] Castagné N, Cadoz C : L'environnement GENESIS : créer avec les modèles physiques masse-interaction – Actes des 9e Journées d'Informatique Musicale (JIM) – Marseille 2002.
- [Castagné&Cadoz.03_#] Castagné N, Cadoz C : Ten Criteria for Evaluating Physical Modeling Schemes – International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-03) proceedings – London, September 03, pp 271-276.
- [Castagné&Cadoz.04a_#] Castagné N, Cadoz C : Physically-Based Modeling and Music vs Physical Modeling and Acoustics – proceedings of the 18th International Congress on Acoustics – ICA'04 – Kyoto, Japon, 2004/04/04 (4 pages - publication CDrom).
- [Castagné&Cadoz.04b_#] Castagné N, Cadoz C : The GENESIS Environment: Physical Modeling as a Language to be Practiced by Musicians – proceedings of the 18th International Congress on Acoustics – ICA'04 – Kyoto, Japon, 2004/04/04 (4 pages - publication CDrom).
- [Castagné&Cadoz.04c_#] Castagné N, Cadoz C : Some Criteria for Evaluating Physical Modeling Schemes in the context of Music Creation – International Symposium on Musical Acoustics – ISMA'04 – Nara, 2004/03/31- (4 pages - publication CDrom)
- [Castagné&Cadoz.04d_#] Castagné N, Cadoz C : The Mass-Interaction Scheme as a Musical Language: the GENESIS Environment – International Symposium on Musical Acoustics – ISMA'04 – Nara, 2004/03/31-- (4 pages - publication CDrom)
- [Castagné&Cadoz.05_#] Nicolas Castagné & Claude Cadoz: “A goals-based review of Physical modelling”, International Computer Music Conference - ICMC 2005 – SUVISOFY Oy Ltd Finland ed., Barcelone, vol. 1/1 (2005), pp.343 à 346
- [Castagné&Cadoz.09_#] Nicolas Castagné, Claude Cadoz : “GENESIS3 – plate-forme pour la creation musicale a l'aide des modeles physiques cordis-anima” - Actes des 14ème Journées d'Informatique Musicale - Grenoble, 1-3 avril 2009 - pp161-170.
- [Castagné&Cadoz.09a_#] Nicolas Castagné, Claude Cadoz : “GENESIS3 – plate-forme pour la creation musicale a l'aide des modeles physiques cordis-anima” - Actes des 14ème Journées d'Informatique Musicale - Grenoble, 1-3 avril 2009 - pp161-170.

- [Castagné&Cadoz.98_#] Castagné N, Cadoz C : Synthèse de sons par modèles physiques : caractérisation et exploration des potentialités de la spatialité des structures vibrantes – Actes des Journées d'Informatique Musicale (JIM) 98 – LMA Publication – Lalonde 1998.
- [Castagné&Lagarde.07_#] Nicolas Castagné and Julien Lagarde: Mapping, in human-computer systems. In *Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms*, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0 pp192-194.
- [Castet.10] Conception et Réalisation de plates-formes de simulation synchrone multisensorielle interactive - L'interaction instrumentale et les réalités virtuelles. Mémoire de Thèse, Ingénierie de la cognition, de l'interaction, de l'apprentissage et de la création (EDISCE), Grenoble INP, sous la direction de Jean Loup Florens, soutenue le 24 avril 2010.
- [Caussé.90] Caussé R : Non-Linéarités et phénomènes non-linéaires dans les instruments à cordes – Actes du Colloque Modèles Physiques, Création Musicale et Ordinateurs – organisé par l'ACROE, Grenoble 1990 – Edition de la Maison des Sciences de l'Homme – Paris, 1994.
- [Christou et al.11a_#] Maria Christou, Olivier Tache, Claude Cadoz, Nicolas Castagné, Annie Luciani: Consistent Music and Animation Cooperation by Physical Models. Conférences de la manifestation « Art Science Technologie » de la manifestation #AST11. - dans *Ambiant and Instrumental Creativity / Créativité Instrumentale et Créativité Ambiante*. ACROE/Enactive Systems Books publisher, 2011 – ISBN 978-2-9530856-1-7 – disponible en ligne <http://aicreativity.eu/> 2011 (accédé décembre 2013)
- [Christou et al.11b_#] M. Christou, O. Tache, C. Cadoz, N. Castagné, A. Luciani : « Modeling of audio-graphic scenes with mass-interaction physical models ». Communication. Workshop « Versatile Sound Models for Interaction in Audio-Graphic Virtual Environments: Control of Audio-graphic Sound Synthesis », Satellite Workshop 1 of the 14th International Conference on Digital Audio Effects, organisé par Organizers: Roland Cahen, Diemo Schwarz, Hui Ding. DAFx-11 September 19-23, 2011 Paris, France. 23 septembre 2011. Présentation et vidéo en ligne : <http://www.topophonie.fr/event/3http://aicreativity.eu/node/92> 2011 (accédé décembre 2013)
- [Corbun&Cadoz.95] Cadoz C, corbun O : GENESIS : Environnement Interactif pour la Création Musicale à l'aide de la Simulation d'Instruments par Modèles Physiques – Rapport de DEA d'Informatique – ACROE – Ecole National Supérieur d'Informatique et Mathématiques Appliquées – Université Joseph Fourier – Grenoble 1995.
- [Couroussé.07] Damien Couroussé : "Haptic board". Contributeurs : JL Florens et N Castagné. In *Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms*, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 126-127
- [Darles et al.11] Darles, E., Kalantari, S., Skapin, X., Crespin, B., Luciani, A., 2011. Hybrid physical – topological modeling of physical shapes transformations. In *Proc. of CASA 2011 - Digital Media and Digital Content Management*, pp. 154–157.
- [DeBoeck.07] Joan De Boeck: Multimodality, in human-computer interaction. In *Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms*, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.
- [deGotzen et al.07_#] Amalia de Götzen, Charlotte Magnusson, and Nicolas Castagné : Auditory feedback in VR and HCI. In *Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms*, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0 pp18-19.
- [Evrard.09] MIMESIS, un environnement de conception et de simulation de modèles physiques particuliers masses-interactions CORDIS-ANIMA pour l'animation : du mouvement généré à l'image du mouvement. Thèse de doctorat en Ingénierie de l'interaction, de la cognition, de l'apprentissage et de la création (IC2A), école doctorale EDISCE, Université de Grenoble. Dirigée par Claude Cadoz et Annie Luciani. Soutenue le 25 septembre 2009.
- [Evrard et al.06a_#] Matthieu Evrard, Annie Luciani, Nicolas Castagné: "MIMESIS: Interactive Interface for Mass-Interaction Modeling", *Proceedings of CASA 2006*, Geneva, July 2006, Nadia Magnenat-Thalmann & al. editors. pp177-186.
- [Evrard et al.06a_#] Matthieu Evrard, Annie Luciani, Nicolas Castagné: "MIMESIS: Interactive Interface for Mass-Interaction Modeling", *Proceedings of Conference on Computer Animation and Social Agents - CASA 2006*, Geneva, July 2006, Nadia Magnenat-Thalmann & al. editors. pp177-186.
- [Evrard et al.06b_#] Matthieu Evrard, Nicolas Castagné, Annie Luciani & Claude Cadoz, "Musical gestures and motion format in VR multisensory context", In *proceedings of Music and Gesture 2006*, Manchester, July 2006.

- [Evrard et al.06c_#] Matthieu Evrard, Damien Couroussé, Nicolas Castagné, Claude Cadoz, Jean-Loup Florens, Annie Luciani: "THE GMS FILE FORMAT: Specifications of the version 0.1 of the format" – September 2006. Available on <http://acroe.imag.fr/gms> 2011 (accédé décembre 2013)
- [Florens et al.04_#] Florens JL, Luciani A, Cadoz C, Castagné N : ERGOS: Multi-degrees of Freedom and Versatile Force-Feedback Panoply – Short Paper - proceedings of the International Conference EUROHAPTICS 2004, Munich, Germany, 2004/06/05-07, pp356-360.
- [Florens et al.05_#] Jean-Loup Florens, Nicolas Castagné, Annie Luciani, Ghislain Kergadallan, Geoffrey Cerna: "Computer hardware and Operating Systems for high quality enactive interfaces featuring interactive and multi-sensory simulation of physical objects: Study of a computer Platforms; State of the Art Report; Specifications; theoretical study; benchmarks" – Internal Report ACROE, 2005. Available on the internet from <http://acroe.imag.fr> - 30 pages. 2011 (accédé décembre 2013)
- [Gibet.87] Gibet S : "Codage, représentation et traitement du geste instrumental". – Thèse d'Informatique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, – ACROE-LIFIA- INPG – Décembre 1987.
- [Gillespie&O'Modhrain.11] "Embodied cognition as a motivating Perspective for Haptic Interaction Design : A position Paper", R.B. Gillespie ; S. O'Modhrain, World Haptics 2011, p481-486.
- [GMS.06_#] Nicolas Castagné, Annie Luciani. « The GMS format homepage » - site internet de référence pour le format geste GMS (Gesture and Motion Signal format) : librairie, documentations théorique et technique. Disponible en ligne à : <http://acroe.imag.fr/gms> (accédé décembre 2013)
- [Guilbaud et al.03_#] Guilbaud C, Luciani A, Castagné N : Physically-Based Particle Simulation and Visualization of Pastes and Gels – long paper, GraphiCon Conference on Computer Graphics – Moscow, 2003, pp 66-72.
- [Guilbaud et al.03_#] C. Guilbaud, A. Luciani, N. Castagné. Physically-based particle simulation and visualization of pastes and gels. Proc. of GRAPHICON 2003. Moscou. 2003/09.
- [Heïgeas et al.03_#] Heïgeas L, Luciani A, Thollot J, Castagné N : A Physically-Based Particle Model of Emergent Crowd Behaviors – long paper, GraphiCon Conference on Computer Graphics – Moscow, 2003, pp 73-80.
- [Heigeas et al.03_#] Laure Heigeas, Annie Luciani, Joelle Thollot, and Nicolas Castagné. A : physically-based particle model of emergent crowd behaviors. In International Conference Graphicon 2003, pages 1–9, september 2003.
- [Jaffe.95] Jaffe DA : Ten Criteria for Evaluating Synthesis Techniques – CMJ vol 19/1 –MIT Press1995.
- [Jensenius et al.07a_#] Alexander Refsum Jensenius, Nicolas Castagné, Antonio Camurri, Esteban Maestre, Joseph Malloch, Douglas McGilvray : « A Summary of Formats for Streaming and Storing Music-Related Movement and Gesture data » - Proceedings of the 4th International Conference on Enactive Interfaces 2007 « Enactive / 07 - Enaction_ in_Arts » - November 19 - 24, 2007, Grenoble, France – pp125 – 128.
- [Jensenius et al.07b_#] Alexander Refsum Jensenius, Antonio Camurri, Nicolas Castagné, Esteban Maestre d, Joe Malloch, Dougie McGilvray, Diemo Schwarz, Matt Wright: "Panel: the need of formats for streaming and storing music-related movement and gesture data" - proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC'07) – Copenhagen, 2007 – ISBN 0-9713192-5-1.
- [Jund et al.12] Jund, T., Allaoui, A., Darles, E., Skapin, X., Meseure, P., Luciani, A., 2012. Mapping volumetric meshes to point-based motion models. In Proc. of VRIPHYS 2012, pp. 11–20.
- [Kalantari et al.14#] Kalantari S, Luciani A, Castagné N : "A New Way to Model Physics-Based Topology Transformations: Splitting MAT". To be published in the Proceedings of the 12th International Symposium on Smart Graphics, August 27-29 2014, Taipei, Taiwan (8 pages).
- [Lagarde.07a] Julien Lagarde: Multimodality, in cognitive sciences. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.
- [Lagarde.07b] Julien Lagarde: Multimodal (multisensory) integration, in cognitive sciences. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.
- [Leonard et al.12_#] Léonard J., Castagné N., Florens J.-L., Cadoz C: The CORDIS Audio Haptic Real Time Platform for Musical Creation with Instrumental Interaction. In HAID 2012 - 7th International Workshop on Haptics and Audio Interaction Design, Suède (2012) – short paper – pp31-34.
- [Leonard et al.13a_#] James Leonard, Claude Cadoz, Nicolas Castagné and Annie Luciani : "A Virtual Reality Platform for Musical Creation" –Proc. of the 10th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research (CMMR'13), Marseille, France, October 15-18, 2013. ISBN 978-2-2909669-23-6. ISSN 1159-09747. PUBLICATIONS OF L.M.A. editeur. Pp267-283

- [Leonard et al.13b_#] James Leonard, Claude Cadoz, Nicolas Castagné and Annie Luciani : " A Virtual Reality Platform for Multisensory Manipulation of Virtual Musical Instruments" – Demonstration & poster – Proc. of the 10th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research (CMMR'13), Marseille, France, October 15-18, 2013. ISBN 978-2-2909669-23-6. ISSN 1159-09747. PUBLICATIONS OF L.M.A. éditeur. Pp 1051-1054.
- [Leonard et al.13c_#] Leonard, J., Castagné, N., Cadoz, C., Florens, J.L, 2013. Interactive Physical Design and Haptic Playing of Virtual Musical Instruments. In : Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC'13), Perth, Australia, (8 pages).
- [Leonard et al.13d_#] James Leonard, Nicolas Castagné, Claude Cadoz, Jean-Loup Florens. A Modeller-Simulator for Instrumental Playing of Virtual Musical Instruments. Proc. of the 16th int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-13), Maynooth, Ireland, September 2-5, 2013. 6 pages. Available online: <http://dafx13.nuim.ie/proceedings.html> (accédé décembre 2013)
- [Leonard et al.14_#] James Leonard, Claude Cadoz, Nicolas Castagné, Jean-Loup Florens and Annie Luciani : "A Virtual Reality Platform for Musical Creation". A paraître été 2014, Springer Verlag in the *LNCS series*, 25 pages.
- [Luciani.85] Luciani : "Un Outil Informatique de Création d'Images Animées : Modèles d'objets, Langage, Contrôle Gestuel en temps réel. Le Système ANIMA", Thèse de Docteur Ingénieur - I.N.P.G. - Grenoble 1985.
- [Luciani.00] Annie Luciani. From granular avalanches to fluid turbulences through oozing pastes. A mesoscopic physically-based particle model. In Graphicon 2000 Conference Proceedings Graphicon 2000, pages 282–289, Moscou Russie, Fédération De, 2000.
- [Luciani.02] A. Luciani. Multisensory vs multimodal interfaces. The central role of "action". Some elements for a FP6 roadmap. IST Interface Technologies in FP6. Consultation meeting. Luxembourg. 2002/05/13-14.
- [Luciani.04a] Luciani, A. Why and How are Physically-based model able to model Emergent Crowd Behaviors? Invited paper. Proc. of 3IA conference. Limoges (France). 2004/05.
- [Luciani.04b] Annie Luciani, Daniela Urma, Sylvain Marlière, Joël Chevrier: PRESENCE: the sense of believability of inaccessible worlds. Computers & Graphics 28(4): 509-517 (2004).
- [Luciani.07] Annie Luciani: Multimodality and Enaction. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.
- [Luciani.07b] Annie Luciani: Immersion vs. vis-à-vis. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.
- [Luciani.07c] Gesture / movement / action. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.
- [Luciani.09] Annie Luciani. Forme, Image, Mouvement : Vers un art du mouvement visuel. Actes du colloque des Journées d'Informatique Musicale 2009 (JIM09). Grenoble. Avril 2009.
- [Luciani.11] Annie Luciani. « Art kinesthésique et art plastique : Contribution à l'émergence d'un art visuel dynamique ». Dans Créativité instrumentale et créativité ambiante. Ouvrage coordonné par Annie Luciani, Olivier Tache et Nicolas Castagné. ACROE/Enactive Systems Books publisher, 2011 – ISBN 978-2-9530856-1-7 - 4ième Trm 2012. pp 17-64. Reprint du site web <http://aicreativity/eu>, 2011 (accédé décembre 2013).
- [Luciani et al.91] Luciani A, Jimenez S, Florens JL, Cadoz C, Raoult O : "Computational physics : a modeler simulator for animated physical objects", Proceedings of the European Computer Graphics Conference and Exhibition. Vienna, Austria, Septembre 91, Editeur Elsevier
- [Luciani et al.94] Annie Luciani, Claude Cadoz, Jean-Loup Florens. The CRM device : a force feedback gestural transducer to real-time computer animation, Displays: technology and applications, 1994/07, Butterworth - Heinemann, vol. 15 number 3 - pp. 149-155 – 1994.
- [Luciani et al.03_#] Luciani A, Castagné N, Tixier N : Metabolic Emergent Auditory Effects by means of Physical Particle Modeling: the example of Musical Sand – Paper and poster presentation - International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-03) – London, September 03, pp 289-292, poster presentation.
- [Luciani et al.03_#] A. Luciani, N. Castagné, N. Tixier. Metabolic emergent auditory effects by means of physical particle modeling : the example of musical sand. Proc. of DAFX-03. London. 2003/09/8-11.
- [Luciani et al.05_#] Luciani A, Florens JL, Castagné N : "From Action to Sound: a Challenging Perspective for Haptics" – Short Paper – proceedings of the IEEE International Conference World Haptics, Pisa, Italie, 18-20 mars 2005 – 4 pages, poster presentation.

- [Luciani et al.05_#] Luciani, J.L. Florens, N. Castagné : From Action to Sound : A Challenging Perspective for Haptics. A. Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference, 2005, – WorldHaptics 2005 - Pisa, Italy, 18-20 mars 2005. pp592 – 595. ISBN 0-7695-2310-2.
- [Luciani et al.06a_#] Annie Luciani, Matthieu Evrard, Damien Couroussé, Nicolas Castagné, Claude Cadoz & Jean-Loup Florens: "A Basic Gesture and Motion Format for Virtual Reality Multisensory Applications" - in Proceedings of the 1st international GRAPP Conference on Computer Graphics Theory and Applications, ISBN: 972-8865-39-2, Setubal (Portugal), March 2006 – 8 pages.
- [Luciani et al.06b_#] Annie Luciani, Matthieu Evrard, Nicolas Castagné, Damien Couroussé, Jean-Loup Florens, Claude Cadoz, A Basic Gesture and Motion Format for Virtual Reality Multisensory Applications, 2nd ENACTIVE Workshop. May 2006.
- [Luciani et al.09] Luciani, A, Florens, JL, Courousse, D, Castet, J: "Ergotic Sounds: A New Way to Improve Playability, Believability and Presence of Virtual Musical Instruments" - Journal of New Music Research, Volume 38, Number 3, September 2009, pp. 309-323(15)
- [Luciani et al.12] Annie Luciani, Daniel Barthélemy, Jean-Loup Florens : Geste réel sur matière simulée : une observation expérimentale de l'énaction. Dans Créativité Instrumentale et Créativité Ambiante. ACROE/Enactive Systems Books publisher, 2012 – ISBN 978-2-9530856-1-7.
- [Luciani et al.12_#] Créativité instrumentale et créativité ambiante. Ouvrage coordonné par Annie Luciani, Olivier Taché et Nicolas Castagné. ACROE/Enactive Systems Books publisher, 2011 – ISBN 978-2-9530856-1-7 - 4ième trim. 2012, 356 pages. Reprint du site web <http://aicreativity.eu>, 2011 (accédé décembre 2013).
- [Luciani et al.14a_#] Annie Luciani, Ali Allaoui, Nicolas Castagné, Emmanuelle Darles, Xavier Skapin, Philippe Meseure. MORPHP-Map: A New Way to Model Animation of Topological Transformations. Proceedings of the 9th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, 2014, Lisbonne. A paraître.
- [Luciani et al.14b_#] Luciani A, Castagné N, Meseure P, Skapin X, Kalantari S, Darles E : "A New Modeling Pipeline for Physics-Based Topological Discontinuities: the DYNAMe Process". To be published in the Proceedings of the 12th International Symposium on Smart Graphics, August 27-29 2014, Taipei, Taiwan (4 pages).
- [Luciani et al.14c_#] Luciani A, Castagné N, Leonard J: "Haptics Processing Unit Software Architecture for Transportable High Dynamics Force-Feedback Coupling". Proceedings of the International Conference EUROHAPTICS, Versailles, France, June 2014, 8 pages.
- [Luciani&Cadoz.07_#] A Luciani & C. Cadoz, eds. Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0, 338 pages.
- [Luciani&Evrard.07] Gesture and motion (encoding of). In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.
- [Luciani&Florens.07] Luciani A, Florens JL: "Transparency_2" In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 153-154
- [Marchi et al.10_#] Florence Marchi, Julien Castet, Sylvain Marlière, Nicolas Castagné, Joel Chevrier, Annie Luciani, Jean Loup Florens: "Le concept du NanoLearner : Les mains dans le Nanomonde du grand public à l'Université". 8ème Colloque sur l'enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, 8 - 10 mars 2010, Grenoble, France. J3EA 9 (2011) 0014; 7 pages. Disponible en ligne : <http://dx.doi.org/10.1051/j3ea/2010017> (accédé décembre 2013).
- [Moss&Cunitz.05] W. Moss and B. Cunitz. Haptic Theremin: Developing a haptic musical controller using the sensible phantom omni. In Proceedings of the International Computer Music Conference, Barcelona, Spain, Sept. 2005. vol. 2005, 2005
- [Muniz.02] David Muniz Mendz, "Implantation sur une architecture multiprocesseur d'un serveur pour la simulation temps réel interactive des modèles physiques", Grenoble, Stage de 3ème année de l'ENSIMAG, tuteur Jean-Loup Florens, 2002.
- [Pasquinelli.07a] Elena Pasquinelli: Enactive cognitive sciences_2. In Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.

- [Pasquinelli.07b] Elena Pasquinelli: Multimodal (multisensory) integration: the binding problem. In *Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms*, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.
- [Pirhonen&Tuuri.08] “In Search for an Integrated Design Basis for Audio and Haptics”, A. Pirhonen, K. Tuuri. HAID 2008, Lecture Notes in Computer Science Volume 5270, 2008, pp 81.
- [Ramstein.91] Ramstein C : “Analyse, représentation et traitement du geste instrumental – application aux instruments à clavier” – Thèse d’Informatique de l’Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble - décembre 1991.
- [RapAct.04] Claude Cadoz et Annie Luciani : Rapport d’activité 2004. Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d’Expression & Laboratoire ICA Informatique et Création Artistique de Grenoble INP. Rédigé et présenté en 2005.
- [RapAct.12_#] Annie Luciani, Nicolas Castagné (coordinateurs). Annie Luciani, Claude Cadoz, Nicolas Castagné, Jean-Loup Florens (auteurs) : Rapport d’activité 2012 - Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d’Expression & Laboratoire ICA Informatique et Création Artistique de Grenoble INP. Présenté au Conseil d’Administration et à l’Assemblée Générale de l’ACROE du 16 avril 2013.
- [RapActQuad.10] Claude Cadoz et Annie Luciani : Rapport d’activité quinquennal 2005 –2009. Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d’Expression & Laboratoire ICA Informatique et Création Artistique de Grenoble INP. Grenoble 22 mars 2010.
- [Risset.90] Risset JC : Modèles physiques et perception, Modèles physiques et composition – Actes du Colloque Modèles Physiques, Création Musicale et Ordinateurs – organisé par l’ACROE, Grenoble 1990 – Edition de la Maison des Sciences de l’Homme – Paris, 1994.
- [Risset.99a] Risset JC : Evolution des outils de création sonore – in *Interfaces homme-machine et création musicale* – sous la direction de H Vinet et F Delalande – Hermès, 1999.
- [Sillam.11] Kevin Sillam : Gravure dynamique : visualisation par modèle physique pour l’animation et les réalités virtuelles. Thèse de doctorat en Ingénierie pour la santé, la cognition, et l’environnement, école doctorale EDISCE, Université de Grenoble. Dirigée par C Cadoz et A Luciani. Soutenue le 14/12/ 2011.
- [Sinclair et al.10] A Haptic Simulator For Gestural Interaction with the Bowed String”, S. Sinclair, J.L. Florens, M.M. Wanderley, 10ème congrès français d’acoustique, 2010.
- [Stewart.07] John Stewart: Enactive cognitive sciences_1. In *Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms*, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007. ISBN 978-2-9530856-0-48 pp164-167.
- [Uhl et al.95] Uhl C, Florens JL, Luciani I, Cadoz C : «Hardware Architecture of a Real Time Simulator for the Cordis-Anima System : Physical Models, Images, Gestures and Sounds» - Proc. of Computer Graphics International '95 - Leeds (UK), 25-30 June 1995. Academic Press. RA Ernshaw & JA Vince Ed. pp421-436
- [VanNort&Castagné.07_#] Doug Van Nort and Nicolas Castagné: Mapping, in digital musical instruments. In *Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms*, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0 pp191-192.
- [Varni&Castagné.07_#] Giovanna Varni and Nicolas Castagné: Multimodal (multisensory) integration, in technology. In *Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms*, edited by A. Luciani and Claude Cadoz, Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-0 pp209-211.
- [Varni&Castagné.07_#] Giovanna Varni Nicolas Castagné: Multimodal (multisensory) integration, in technology. In *Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms*, A. Luciani and C. Cadoz eds. Enactive System Books, 2007 – ISBN 978-2-9530856-0-48. pp. 164-167.
- [Villeneuve.12] Jérôme Villeneuve, Claude Cadoz. « Inverse problem in sound synthesis and musical creation using mass-interaction networks ». Proceedings of the 9th Sound and Music Computing Conference – SMC’09 - Copenhagen – 2012. The Journal of the Acoustical Society of America. 10/2011; 130(4):2507. DOI:10.1121/1.3654987.
- [Wanderley.99] Wanderley M : Contrôle gestuel de la synthèse sonore – in *Interfaces Hommes- Machine et Création Musicale*, – sous la direction de Vinet H et Delalande F - Hermes, Paris, 1999.
- [Wanderley et al.04] M Wanderley and P Depalle: “Gestural Control of Sound Synthesis”, Proceedings of the IEEE, 2004.
- [Wanderley&Battier.00] Trends in Gestural Control of Music. M. M. Wanderley and M. Battier, eds, Ircam – Centre Pompidou 2000 – electronic book - avec CDROM.